

## Retombées socio-économiques du FCC-ee

### Contexte

Le présent rapport a été rédigé dans le cadre du projet H2020 FCCIS ("*FCC Innovation Study*"), cofinancé par l'Union européenne. L'objectif est d'inscrire le Futur collisionneur circulaire (FCC) dans un scénario durable en déterminant et en analysant les impacts socio-économiques potentiels du projet, et en élaborant des stratégies et des plans permettant qu'ils soient pris en compte dans ce scénario dès le début. L'estimation des impacts socio-économiques s'appuie sur une hypothèse de travail concernant l'ampleur des ressources affectées au projet FCC. Le rapport inclut donc une estimation du coût total du projet. Le projet FCCIS est pleinement intégré à l'étude internationale de faisabilité du FCC menée sous l'égide du CERN.

### Les retombées en chiffres

Type de retombées	Valeur non actualisée en millions de francs suisses	Valeur non actualisée en millions de francs suisses	%
<b>Contenus scientifiques</b>	7 885	4 768	14%
<b>Valeur de la formation</b>	10 817	4 106	12%
<b>Les avantages procurés à l'industrie</b>	10 474	6 907	20%
... pour les fournisseurs	9 806	6 497	
... spin-offs	668	410	
<b>Les logiciels libres et ouverts, les systèmes et les plateformes</b>	16 085	10 441	30%
... développement d'une plateforme d'information	4 434	2 808	
... développement d'un système collaboratif	5 274	3 129	
... développement de logiciel des développements des détecteurs	6 378	4 504	
<b>Culture</b>	4 981	3 224	9%
... visiteurs sur les sites	4 206	2 760	
... visiteurs en ligne	774	464	
<b>Avantages environnementaux</b>	3 601	2 204	6%
... valorisation des matériaux excavés	517	393	
... sources d'énergie renouvelables	2 628	1 545	
... valorisation de la chaleur résiduelle	455	266	
<b>Valeur résiduelle</b>	6 938	3 401	10%
<b>R: Retombées quantifiées</b>	-	<b>35 050</b>	100%
<b>C: Coûts (Capex + Opex) (C)</b>	32 425	<b>21 169</b>	
<b>Valeur actuelle (R - C)</b>	-	<b>13 881</b>	
<b>Rapport bénéfice-coût</b>	-	<b>1.66</b>	

## Résumé

Le présent rapport donne des informations détaillées sur les données recueillies, les hypothèses envisagées, les méthodes employées et les résultats de l'analyse des impacts socio-économiques pour la première phase de mise en place de l'infrastructure de recherche FCC, à savoir la construction du collisionneur de leptons (FCC-ee). L'analyse porte sur l'intégralité du cycle de vie du FCC-ee, ce qui englobe sa conception, sa construction, son exploitation et les différentes améliorations apportées au fil du temps en vue du relèvement de l'énergie du collisionneur, dont la durée de vie devrait être de 37 ans. L'approche méthodologique se fonde sur la littérature la plus récente et des recherches empiriques quantifiant les impacts économiques générés par les infrastructures de recherche, ainsi que sur les recommandations du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) pour la durabilité à long terme des infrastructures de recherche.

L'évaluation du projet FCC-ee expose les coûts prévus et les bénéfices attendus à chaque étape. Un scénario sans mise en place du projet est également envisagé. Dans ce scénario contrefactuel, le LHC (Grand collisionneur de hadrons) continuerait à fonctionner jusqu'à sa fin de vie prévue et l'on ne construirait pas de nouveau collisionneur de particules. Le CERN continuerait ses activités avec les accélérateurs de particules et les infrastructures pour les expériences actuelles. Une telle approche, axée sur les effets pouvant être directement attribués au projet FCC-ee, vise à mettre en évidence le changement « net ».

L'analyse d'impact socio-économique se fonde sur l'hypothèse d'un projet FCC-ee comportant deux grandes expériences, nécessitant l'intervention d'environ 176 000 personnes sur l'ensemble de sa durée. Ce groupe diversifié est composé de scientifiques, d'ingénieurs, de techniciens, de personnel administratif, de chercheurs doctoraux et postdoctoraux et d'étudiants de premier cycle. Environ 10 % du nombre total de participants travailleraient sur les accélérateurs de particules et les infrastructures techniques, les 90 % restants travaillant sur les détecteurs et la physique expérimentale. On sait que le scénario de référence actuel du projet FCC-ee prévoit quatre expériences. Ce changement devra être pris en compte lors de l'actualisation future de l'étude.

Le projet FCC-ee est envisagé comme un projet à objectif de coût, l'investissement total étant estimé à environ 12 milliards de francs suisses dans le scénario pris pour hypothèse dans cette étude. Ce montant correspond aux dépenses pour le génie civil, les infrastructures techniques et les accélérateurs de particules, ainsi qu'aux coûts d'investissement liés aux détecteurs et aux expériences. Les dépenses de fonctionnement englobent toutes les ressources humaines affectées au projet, quelle que soit l'organisation les employant, ainsi que les dépenses nécessaires (coûts indirects et décaissements) pour faire fonctionner, entretenir et réparer l'infrastructure de recherche du FCC-ee pendant toute la durée du projet (par exemple l'électricité, l'eau, les pièces de rechange et les ressources humaines mobilisées pour l'entretien et les réparations). Ces dépenses de fonctionnement s'élèvent à 20 milliards de francs suisses, ce qui équivaut à un montant annuel d'environ 600 millions de francs suisses sur toute la durée du projet.

Les estimations des coûts et du nombre de participants au projet figurant dans cette étude doivent être considérées comme une hypothèse de travail, utile pour évaluer les impacts socio-économiques du projet et contribuer à déterminer les chemins d'impact majeurs et les chemins dont l'impact est moindre et qui nécessitent plus d'attention. Ces estimations sont réalisées sur la base des éléments disponibles au moment de l'analyse et devront être révisées et précisées au fur et à mesure que le projet prendra forme.

Il n'est pas possible de déterminer de manière exhaustive et, par conséquent, d'analyser tous les avantages potentiels qu'une grande infrastructure de recherche telle que le FCC-ee pourrait apporter. La concrétisation de ces avantages dépend pour une large part de la mise en place d'un cadre favorable à la création d'impacts. Par exemple, les avantages économiques découlant des visites supposent l'existence d'un programme de visites bien conçu et de lieux destinés à ces visites. Certains avantages sont par essence difficiles à évaluer, par exemple ce qui concerne les progrès des connaissances scientifiques, les effets liés à la diplomatie scientifique, les considérations éthiques et la confiance dans la science. Par ailleurs, certains impacts sont difficiles à prévoir à ce stade peu avancé du projet. C'est

pourquoi l'analyse est axée sur les avantages directs connus et prévisibles actuellement sur la base d'enseignements tirés d'expériences passées telles que le LHC et le projet européen XFEL.

L'analyse a été achevée dès qu'un point d'équilibre fiable entre avantages et coûts totaux a été atteint. Toutes les estimations ont été établies à partir d'hypothèses prudentes. D'autres recherches seront menées ultérieurement afin d'estimer la fonction de distribution de probabilités des impacts et de déterminer les facteurs influant le plus fortement sur ces impacts. À cette fin, il sera procédé à une simulation de Monte Carlo.

Le premier chemin d'impact ayant fait l'objet d'une évaluation correspond à la valeur créée par **la production de contenus scientifiques**. Cette création de valeur peut être attribuée au flux de connaissances produit par les scientifiques et les ingénieurs travaillant sur le collisionneur et ses expériences et prendre la forme de différents produits scientifiques, depuis les articles de revues scientifiques et les documents de travail, jusqu'aux exposés et travaux de conférences. Ces produits peuvent avoir un impact durable, au-delà de la communauté de la physique des hautes énergies, influencer sur d'autres domaines de la connaissance et permettre de relever des défis sociétaux plus larges. Des techniques scientométriques ont été utilisées pour estimer l'ampleur de la production scientifique et sa diffusion en dehors du cadre du projet FCC-ee. La méthode retenue incluait l'analyse des constantes historiques observées dans des programmes de recherche en physique des hautes énergies comparables tels que le Tevatron, le LEP et le LHC. Les concepts économiques de coût de substitution et de valeur du temps ont été introduits pour déterminer la valeur sociale des produits scientifiques. L'approche utilisée se fonde sur le calcul du temps nécessaire pour obtenir ces produits et sur l'estimation de la valeur compte tenu du salaire horaire moyen des personnes concernées. Cette méthode a été appliquée pour estimer la valeur sociale des produits scientifiques créés par les chercheurs intervenant directement dans le programme de recherche (produits de niveau 0), des produits s'appuyant sur les connaissances de niveau 0 (produits de niveau 1) et des produits s'appuyant sur les connaissances de niveau 1 (produits de niveau 2). Plus de 22 000 produits scientifiques devraient être directement créés par les chercheurs dans le cadre du projet FCC-ee et 300 000 autres produits, fondés sur ces mêmes produits, devraient être créés d'ici à 2080. En partant du postulat que les créateurs consacrent 55 % de leur temps aux activités de recherche et à la création de produits scientifiques, on estime que les bénéfices générés par la production scientifique s'élèvent à environ 7,86 milliards de francs suisses ( $\pm 4$  % selon les scénarios les plus pessimistes ou les plus optimistes). Cette évaluation prend en compte la diminution de la valeur des produits de niveau 1 et de niveau 2 par rapport aux produits de niveau 0 à mesure que les connaissances se diffusent lors des vagues de production successives et que l'apport de valeur initial dû au projet FCC-ee décroît.

**La valeur de la formation** est le deuxième chemin d'impact étudié. Elle met en évidence le rôle du projet FCC-ee dans la diffusion des connaissances, ainsi que dans la promotion du développement des compétences et le renforcement des capacités des personnes participant activement au programme de l'infrastructure de recherche tout au long de son cycle de vie. Cette analyse inclut une évaluation spécifique des avantages retirés par les apprentis, les stagiaires, les étudiants techniques, les doctorants, les chercheurs postdoctoraux et les membres du personnel associé jusqu'à un âge limite de 30 ans. En revanche, l'analyse ne prend pas en compte la valeur de la formation pour d'autres membres du personnel hautement qualifiés, le personnel temporaire, le personnel contractuel et les professionnels ayant œuvré au projet avant de passer à d'autres domaines industriels. Pour calculer l'avantage retiré par les participants ayant acquis de l'expérience professionnelle au sein du programme de recherche, on a évalué dans quelle mesure leur avancement professionnel s'en était trouvé accéléré à partir de leur entrée sur le marché du travail. Des études précédentes, dont les résultats ont été confirmés par une enquête portant sur environ 2 600 personnes, montrent que le bénéfice salarial tout au long de la vie professionnelle pour un chercheur débutant travaillant auprès du projet FCC-ee s'inscrit dans une fourchette allant d'au moins 2 % à 10 % au maximum pour la durée moyenne de travail au sein de l'infrastructure de recherche (3,78 ans). L'avantage socio-économique total est ici évalué à environ 10,8 milliards de francs suisses ( $\pm 66$  %).

Le troisième chemin d'impact concerne les avantages procurés à **l'industrie** par le projet. Il s'agit des avantages retirés par les fournisseurs qui participent à la conception, à la construction et à l'exploitation de la nouvelle infrastructure de recherche, ainsi que de la création d'entreprises dérivées, en particulier

dans le secteur des technologies de l'information et de la communication. Ces avantages correspondent à l'augmentation de la performance financière des fournisseurs, résultant de l'acquisition de connaissances à l'occasion de cette étroite collaboration avec l'infrastructure de recherche. Ces connaissances contribuent à son tour à la création et à l'amélioration de nouveaux processus, produits et services, que les fournisseurs peuvent exploiter par la suite sur d'autres marchés et dans d'autres domaines. Un multiplicateur de profit a été calculé. Il s'élève à 1,96 pour les achats présentant un niveau d'intensité technologique faible ou modéré, et à 3,09 pour les achats offrant un fort niveau d'intensité technologique. Si on applique ce multiplicateur aux dépenses d'investissement, les profits sont estimés à environ 9,8 milliards de francs suisses ( $\pm 3\%$ ). En ce qui concerne les entreprises dérivées, des données historiques permettent de supposer que le projet FCC-ee aboutirait à la création d'environ deux nouvelles entreprises dérivées dans le seul secteur des technologies de l'information et de la communication, et ce, chaque année, depuis la phase de conception et de préparation jusqu'à la fin de la période d'observation. Compte tenu de la probabilité de survie des entreprises concernées chaque année et de la valeur marchande annuelle des entreprises dans le secteur des technologies de l'information et de la communication, l'avantage socio-économique est estimé à 667,5 millions de francs suisses (-10 % dans le scénario pessimiste et +43 % dans le scénario optimiste). Au total, pour le secteur industriel, les bénéfices directs générés par le projet FCC-ee sont estimés à environ 10,5 milliards de francs suisses.

Le quatrième chemin d'impact englobe **les logiciels libres et ouverts, les systèmes et les plateformes** ayant un lien de causalité avec le programme de recherche, ainsi que la fourniture de données ouvertes par l'infrastructure de recherche. L'étude s'est concentrée sur la quantification des impacts socio-économiques d'une sélection d'outils et de logiciels en matière de technologies de l'information et de la communication essentiels à la réalisation du projet FCC-ee, pour lesquels des données historiques mesurables, d'une qualité suffisante et pour des périodes pertinentes, permettaient de développer un modèle. Un modèle économétrique a été élaboré afin d'estimer l'impact socio-économique d'un nouveau répertoire d'archives virtuel destiné à satisfaire les besoins des collaborations FCC-ee en matière de stockage et d'utilisation de données. Cette estimation est calculée en se fondant sur les avantages mesurables liés à des répertoires comparables et englobe le stockage des données, l'utilisation en ligne et les téléchargements, déduction faite de la valeur actuelle de la création du répertoire, des frais de fonctionnement et des frais d'entretien. Cet avantage est estimé à 4,4 milliards de francs suisses. En outre, la valeur créée par le développement d'un nouveau service visant à faciliter la collaboration mondiale liée au projet FCC-ee (réunions, appels, gestion des événements) a été estimée à 5,3 milliards de francs suisses en prenant en compte l'hypothétique volonté de payer (VDP) des utilisateurs privés d'un tel outil. Enfin, on a estimé que les impacts socio-économiques d'un logiciel de simulation de détecteur, nouvellement créé ou ayant subi une importante mise à jour, éventuellement utilisable en dehors du domaine de la physique des hautes énergies, correspondraient aux économies que réaliseraient les utilisateurs externes en adoptant le logiciel mis gratuitement à disposition par le CERN et d'autres contributeurs. La valeur estimée s'établit à 6,4 milliards de francs suisses. La valeur socio-économique liée aux technologies de l'information et de la communication et aux données représente au total environ 16 milliards de francs suisses.

Le cinquième chemin d'impact concerne l'intérêt des non-spécialistes. Il s'agit des activités directement liées à la recherche scientifique et aux technologies employées à cette fin, ainsi qu'à la conception et à l'exploitation des accélérateurs de particules et des expériences. Pour les besoins de cette étude, l'accent a été mis sur les visiteurs du CERN et les utilisateurs d'internet et des réseaux sociaux. L'estimation de l'impact de ces activités se fonde sur l'étude du programme LHC, plus précisément sur les indicateurs reflétant l'amélioration de la sensibilisation du grand public aux sciences, l'augmentation de son intérêt et la progression de sa compréhension des sujets scientifiques, des éléments qui, considérés collectivement, constituent l'« **avantage culturel** ». Le projet FCC-ee devrait accueillir plus de 10 millions de visiteurs sur l'ensemble de sa durée, soit 4,25 millions de visiteurs de plus par rapport au scénario contrefactuel. 55 % de ces visiteurs devraient explorer des sites du CERN, notamment le tout nouveau Portail de la science, le LHC, qui ne sera plus en activité, et deux de ses expériences (CMS et ATLAS). 45 % des visiteurs devraient explorer l'expérience FCC-ee et les infrastructures souterraines, y compris les chantiers. L'avantage procuré par les visiteurs a été estimé au moyen de la méthode du coût du trajet, qui prend en compte les coûts supportés par les visiteurs pour se rendre au

CERN et au FCC, la valeur économique du temps consacré aux déplacements et les dépenses liées à la visite effectuées dans la région. Cette estimation a été faite d'après une enquête menée au CERN pendant un an. Cet avantage s'élèverait à 4,2 milliards de francs suisses ( $\pm 15\%$ ), les dépenses effectuées par les visiteurs dans la région représentant entre 44 et 49 %. Quant à l'avantage apporté par les visiteurs en ligne, en contact avec le CERN grâce à internet et aux réseaux sociaux, il a été estimé en tenant compte de la notion de coût de substitution du temps. Après estimation du volume de consultations de pages internet directement associées au projet FCC-ee et de la valeur du temps consacré à ces consultations, cet avantage est évalué à 774 millions de francs suisses. Au terme de cette analyse, le montant total des avantages culturels s'élèverait à 4,98 milliards de francs suisses.

Il a également été procédé à une évaluation de certains des **avantages environnementaux** que le projet FCC-ee pourrait offrir. Parmi ces avantages figure l'objectif, que le CERN s'est assigné, de recourir à des sources d'énergie renouvelable pour l'approvisionnement en électricité du FCC-ee, de réemployer les matériaux d'excavation issus des travaux de construction et d'utiliser la chaleur résiduelle récupérée pendant la phase d'exploitation. Garantir l'approvisionnement en électricité du FCC-ee par la création de sources d'énergie renouvelable serait avantageux car cela permettrait de mettre à la disposition de la population le surplus d'énergie à un coût compétitif et avec une faible empreinte carbone. Cet avantage est estimé à 2,6 milliards de francs suisses. L'avantage qui serait retiré de l'utilisation de la chaleur résiduelle pour le chauffage et le refroidissement dans les zones situées à proximité du collisionneur représente un montant de 455 millions de francs suisses que les consommateurs n'auraient pas à payer. Ces derniers bénéficieraient d'un chauffage beaucoup moins cher que celui procuré par l'actuel mix énergétique, pour une empreinte carbone moindre. En ce qui concerne le réemploi des matériaux d'excavation, l'avantage réside dans l'évitement des coûts de traitement, de transport et d'élimination de ces matériaux hors site. La valeur économique en dehors de cet évitement n'est pas intégrée dans l'estimation étant donné les incertitudes relatives aux options d'utilisation des déblais, qui dépendent, d'une part, de la composition de ces matériaux et, d'autre part, du niveau de maturité technologique des options de réemploi au moment où la construction du FCC débutera. L'adoption à grande échelle des technologies de réemploi des matériaux d'excavation mises au point pour le projet n'est pas non plus prise en compte dans l'estimation. Dans la mesure où elle accroîtrait les avantages produits par les développements à forte intensité technologique, elle est incluse dans le chemin d'impact des retombées industrielles. L'estimation basse de cet avantage s'établit à environ 517 millions de francs suisses, ce qui amènerait l'avantage environnemental à un total de 3,6 milliards de francs suisses.

Outre les impacts mentionnés jusqu'à présent, une partie des investissements, relatifs, par exemple, aux systèmes radiofréquence, à l'infrastructure électrique et aux structures de génie civil, pourrait être utilisée ultérieurement dans un projet de collisionneur d'hadrons. **La valeur résiduelle** importante des actifs du FCC contribue à la durabilité du programme FCC intégré. Cette valeur est estimée à environ 6,9 milliards de francs suisses, ce qui correspond à 56 % de l'investissement total dans le projet FCC-ee.

**Un taux d'actualisation collectif** a été établi spécifiquement pour le projet FCC-ee afin de calculer la valeur cumulée des différents avantages et de la comparer aux coûts. Ce taux ne s'appuie pas sur les taux d'actualisation collectifs mis en avant par les organisations internationales. Il prend en compte le niveau de développement et les préférences de consommation et d'investissement des pays contribuant au budget du CERN et la durée très longue du projet. La valeur du taux d'actualisation collectif est estimée à 2 %.

L'application du taux d'actualisation collectif aux avantages a permis de déterminer que **leur valeur totale s'élève actuellement à 35,1 milliards de francs suisses**. Si on compare cette valeur à la valeur cumulée actuelle des coûts (dépenses d'investissement et dépenses de fonctionnement), soit 21,2 milliards de francs suisses, on obtient **une valeur positive nette de 13,9 milliards de francs suisses**. Le rapport coûts/avantages est de 1,66, ce qui indique que les avantages socio-économiques évalués jusqu'à présent sont supérieurs aux coûts de 66 %. Si on envisage un scénario plus pessimiste (coûts plus élevés et avantages moindres) et un scénario plus optimiste (coûts moindres et avantages plus importants), on constate que la valeur positive nette s'inscrit dans une fourchette allant de 9,5 milliards de francs suisses (avec un rapport coûts/avantages de 1,44) à 17,9 milliards de

francs suisses (rapport de 1,87). Ces résultats indiquent clairement que le projet FCC-ee contribuera de manière positive au bien-être de la société. Ils démontrent la durabilité à long terme de ce projet de nouvelle infrastructure de recherche scientifique.

Cependant, ces résultats doivent servir uniquement de référence. En ce qui concerne les coûts, les estimations sont provisoires. Les effets de la construction sur l'environnement n'ont pas encore été pris en compte dans l'analyse. Une analyse socio-économique plus complète, conduite avec du temps et des ressources supplémentaires, pourrait mettre en lumière d'autres impacts positifs. Jusqu'à présent, l'analyse a permis de déterminer les chemins d'impact majeurs. Elle peut aider à concevoir l'infrastructure de recherche de manière à renforcer durablement la création d'impacts en intégrant l'analyse des impacts sur l'environnement, l'économie et la société dans son ensemble, conformément à la pratique actuelle de l'Union européenne en matière d'évaluation des impacts sur les politiques publiques et sur les infrastructures.

Une enquête exhaustive a été menée auprès d'environ 10 500 personnes dans neuf pays, dont des États membres du CERN et des États non-membres qui pourraient participer au projet FCC, afin d'estimer l'ampleur des avantages attendus pour la société. Cette enquête visait à évaluer la notoriété du CERN et de ses activités de recherche, à évaluer la façon dont était perçu ce que pourrait apporter une nouvelle infrastructure de recherche telle que le FCC et à établir une comparaison entre cette valeur exprimée sous forme monétaire avec les contributions annuelles par habitant versées par les États membres du CERN. Les résultats indiquent que 41 % des personnes interrogées connaissent le CERN et ses missions, ce qui constitue une notoriété satisfaisante même si le CERN est moins connu que d'autres organisations internationales telles que la NASA. Plus de 80 % des personnes interrogées pensent que les recherches scientifiques menées au CERN font progresser notre compréhension de l'Univers et contribuent à l'amélioration de notre qualité de vie. L'éventuelle volonté des pays de participer financièrement au développement de la nouvelle infrastructure de recherche a fait l'objet d'évaluations et a révélé des disparités entre les pays. La valeur médiane par an des contributions envisagées est comprise entre 2 francs suisses en France et 20 francs suisses en Suisse, deux États membres du CERN. En ce qui concerne les États non-membres, la valeur médiane de la VDP varie, allant de 0 pour le Japon à 24 aux États-Unis. Pour le Japon toutefois, la valeur moyenne est de 10 francs suisses, ce qui signifie qu'une part non négligeable de la population adulte japonaise apprécie ce genre de recherche scientifique. L'avantage a été calculé en multipliant l'estimation de la VDP annuelle par habitant par une population totale adulte d'environ 380 millions de personnes (États membres du CERN) sur une période de 30 ans, celle-ci commençant avec les premiers investissements importants dans le projet FCC-ee. Actuellement, la valeur actualisée s'établit à 319 milliards de francs suisses dans les seuls États membres du CERN. Dans tous les cas observés, la valeur publique perçue dans les États membres du CERN est plus élevée que le budget annuel de fonctionnement du CERN, lequel s'élève à 1,4 milliard de francs suisses. La contribution moyenne par habitant dans ces États est d'environ 2,5 euros par an ou d'environ 5 euros par contribuable par an, un montant moins élevé que le prix moyen d'une tasse de café ou de thé dans ces pays. D'après les estimations, la VDP totale est 20 fois supérieure aux coûts estimés et plus de 11 fois supérieure aux avantages quantifiés. Ces résultats démontrent de manière fiable que la décision d'investir dans le programme FCC peut être considérée comme légitime d'un point de vue sociétal étant donné que les personnes qui devraient financer ce programme lui attribuent une valeur supérieure à son coût.

Enfin, ce rapport présente un ensemble de recommandations fondées sur le travail effectué dans le cadre de cette analyse. Ces recommandations visent à assurer un suivi des avantages et à garantir des comptes rendus réguliers, et ce afin que des données actualisées soient prises en compte lors des phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure.

## Conclusions

L'analyse d'impact socio-économique relative au projet de collisionneur électron-positon (FCC-ee) a permis de mettre en lumière de nombreux avantages potentiels dans différents domaines. À l'heure actuelle, la valeur totale estimée des avantages socio-économiques imputables aux infrastructures de recherche du FCC-ee est estimée à 35,1 milliards de francs suisses (estimation prudente). Elle est comprise entre 31,1 (scénario pessimiste) et 38,5 milliards de francs suisses (scénario optimiste). L'évaluation des avantages socio-économiques réalisée jusqu'à présent s'appuie sur l'analyse des chemins d'impact suivants :

- la valeur des produits scientifiques créés par les scientifiques, les ingénieurs et les chercheurs, qui produisent des connaissances supplémentaires par la pratique des citations ;
- les retombées positives pour les fournisseurs et la création d'entreprises dérivées dans le secteur des technologies de l'information et de la communication ;
- le développement de logiciels en libre accès, de plateformes et de services en ligne, dont les applications potentielles vont au-delà du domaine de la physique des hautes énergies ;
- les possibilités de formation et les augmentations salariales pour les chercheurs en début de carrière collaborant au projet FCC-ee ;
- les impacts imputables aux visiteurs, sur place et en ligne ;
- les avantages environnementaux que présentent le réemploi des matériaux d'excavation et de la chaleur résiduelle, ainsi que la production d'électricité à partir de nouvelles sources d'énergie renouvelable ;
- la valeur résiduelle des immobilisations construites pour le FCC-ee, lesquelles seront par la suite utilisées par le FCC-hh.

Ces avantages ont été évalués avec prudence (estimations basses), en prenant en compte les informations relatives à l'état actuel du projet, les enseignements tirés en examinant le cas de précédentes infrastructures de recherche similaires et les analyses d'impact socio-économique. L'étude de Florio et al. portant sur le LHC et le HL-LHC (2016) et celle de Bastianin et Florio (2018) sont de bons exemples à cet égard. En outre, les données recueillies récemment, entre 2020 et 2023, ont joué un rôle crucial dans la réalisation de ces estimations. Dans un souci d'exhaustivité, des données ont été recueillies auprès de 16 000 personnes au moyen d'enquêtes en ligne. Ce groupe diversifié comprenait des membres du public, des visiteurs du CERN, des utilisateurs du CERN, des utilisateurs de plateformes telles que Zenodo et Indico, ainsi que d'anciens chercheurs.

**Le montant que représentent les avantages socio-économiques associés au projet FCC-ee est 1,66 fois supérieur au total des coûts de conception, de construction et d'exploitation du FCC-ee. Le projet FCC-ee présente par conséquent un impact socio-économique net positif.**

Ces résultats devraient être considérés comme provisoires pour le moment car l'estimation des coûts du projet évolue encore, l'analyse des avantages retirés n'est pas encore complète et seuls quelques chemins d'impact ont pu faire jusqu'à présent l'objet d'un chiffrage. En outre, certains impacts négatifs sur l'environnement, liés au volet « construction » du projet (par exemple la consommation de terres agricoles ou l'empreinte carbone) n'ont pas encore été pris en considération dans l'analyse. À l'inverse, en ce qui concerne les avantages que présente le projet, la conduite d'une analyse socio-économique plus approfondie, bénéficiant de plus de temps et de ressources supplémentaires, pourrait mettre au jour d'autres retombées positives.

L'approche adoptée dans cette analyse exclut délibérément l'estimation des effets des progrès des connaissances scientifiques au sein de la société du fait de leur caractère imprévisible par nature. L'évaluation de la valeur de l'infrastructure de recherche en tant que bien public, estimée en tenant compte de la perception du public et de la volonté de contribuer financièrement à la mise en œuvre du projet, permet de se faire une idée des avantages globaux que le FCC-ee présente pour la société. Cette valeur atteint un niveau remarquable : 20 fois plus élevée que les coûts estimés et plus de 11 fois plus élevée que la valeur des avantages chiffrés à ce jour.

La présente analyse, même si elle a besoin d'être affinée, est un outil utile pour aider à la prise de décision, optimiser l'engagement des utilisateurs, définir et atténuer les risques et améliorer l'acceptabilité sociale du projet FCC-ee. Ses résultats soulignent que le projet FCC-ee laisse augurer des impacts positifs tant pour la communauté scientifique que pour la société dans son ensemble, ce qui contribue à sa durabilité à long terme.

## Recommandations

La présente étude a montré que le projet d'infrastructure de recherche FCC-ee en son état actuel et les chemins d'impact connus à ce jour permettent d'assurer un équilibre entre coûts et avantages. Cependant, le potentiel du projet ne peut être pleinement réalisé que si un suivi continu des impacts socio-économiques est intégré aux phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure. Neuf recommandations ont été formulées pour atteindre cet objectif.

**1) Le programme FCC devrait prévoir l'allocation de ressources humaines et matérielles pour permettre la détermination des impacts, ainsi que la conception, la planification, la mise en œuvre, le suivi et l'évaluation du projet, afin de tirer le meilleur parti possible des impacts potentiels et de faire du FCC une infrastructure durable du point de vue socio-économique.**

Le personnel mobilisé doit pouvoir faire en sorte que les résultats de l'évaluation des impacts et que les recommandations relatives à la création d'impacts soient effectivement pris en compte dans la conception du projet si nécessaire, qu'ils soient mis en œuvre et qu'un suivi et une analyse continus et systématiques soient réalisés avec l'aide de tous les participants au projet. Il est donc nécessaire que l'évaluation des impacts socio-économiques constitue une activité transversale dans l'Organisation, avec la participation directe des plus hauts échelons de la Direction et la présentation de rapports au Conseil, la partie prenante clé du CERN. Cette stratégie devrait garantir la durabilité et l'efficacité du processus, et contribuer également à améliorer l'acceptabilité du projet par les pays apportant leur contribution financière.

**2) En ce qui concerne les impacts des produits scientifiques, le programme FCC devrait promouvoir la publication des travaux scientifiques et des études d'ingénierie par la voie dorée du libre accès) et ne pas privilégier l'auto-édition. Il devrait aussi utiliser des canaux de diffusion réputés plutôt que diffuser les informations uniquement sur des serveurs de prépublication. Cette démarche garantit une identification exacte des travaux à des fins de suivi et accroît la probabilité de leur prise en compte.**

La présente étude d'évaluation des impacts socio-économiques a mis en évidence la difficulté d'identifier tous les produits associés aux activités de l'infrastructure de recherche. Il est essentiel de suivre la production scientifique des chercheurs travaillant auprès des expériences et les références à cette production dans les articles et d'autres produits scientifiques. Cependant, les produits scientifiques ne comportant pas d'identifiant numérique unique et de références à des fins de citation, comme c'est souvent le cas pour des comptes rendus d'atelier et des présentations mises en ligne sur des plateformes telles qu'Indico, ne peuvent pas être correctement identifiés et examinés sous l'angle socio-économique. Ces types de produits devraient, dans la mesure du possible, être remplacés ou complétés par des rapports ou des articles dont les références peuvent être citées. L'établissement de partenariats stratégiques avec de grands éditeurs, comme l'illustre le projet SCOAP<sup>3</sup>, est un bon moyen de s'assurer de la présence de publications pouvant être citées. Les plateformes en libre accès utilisées pour la diffusion des informations pourraient intégrer des fonctionnalités de suivi des téléchargements, des citations et des références, si elles n'en disposent pas encore. C'est par exemple le cas, actuellement, de Zenodo et ArXiv. En outre, de nouvelles recherches sont nécessaires pour développer le contrôle et le suivi du contenu scientifique au-delà des articles et des exposés portant sur les sciences et l'ingénierie et pour inclure les ouvrages. Il s'agit de mieux comprendre comment la société accroît ses connaissances avec le programme FCC.

**3) En ce qui concerne la valeur de la formation, le programme FCC devrait prévoir l'établissement d'un cadre visant à suivre la vie professionnelle des personnes ayant quitté le CERN afin de faciliter l'analyse de leur évolution de carrière.**

Toute personne participant au projet FCC pour une durée minimum devrait être encouragée à s'inscrire, sur la base du volontariat, dans un programme complet de suivi. Cette initiative, par des mécanismes permettant d'entrer régulièrement en contact avec elles, déboucherait sur un suivi à long terme et le recueil périodique d'un ensemble d'informations de base sur leur emploi actuel.

**4) Afin de garantir l'analyse effective des retombées industrielles pendant la mise en œuvre du projet, le programme FCC devrait intégrer un suivi systématique des impacts économiques des achats effectués auprès des fournisseurs sur des périodes couvrant plusieurs années.**

Étant donné que ces effets peuvent ne pas être immédiatement apparents et peuvent se faire sentir au-delà de la durée du marché, il est essentiel que les entreprises concernées puissent faire part de leurs commentaires. Il faudrait établir un cadre général de suivi des achats qui faciliterait la continuité de la collaboration avec les fournisseurs. Un tel cadre comprendrait des dispositions permettant de conserver des informations relatives aux personnes ayant pris part à l'établissement du contrat et d'assurer un suivi régulier à la fin dudit contrat. Ce cadre devrait également faciliter le recueil d'informations essentielles concernant les retombées pour l'entreprise ayant bénéficié des achats du CERN.

Des procédés tels que la réalisation de courtes enquêtes en ligne, conçues pour recueillir des données pertinentes, permettraient d'atteindre cet objectif. L'adoption de cette approche permettrait de rassembler des informations précieuses sur les impacts économiques à long terme des achats effectués dans le cadre du programme FCC et d'améliorer les activités d'achat et la collaboration avec les partenaires industriels.

**5) Les technologies de l'information et de la communication sont considérées comme un chemin d'impact majeur, qu'il conviendrait de renforcer au moyen d'actions ciblées permettant à la société d'en tirer parti, qui seraient assorties d'un contrôle systématique des progrès accomplis.**

Le CERN et le FCC constituent un environnement sans pareil dans le monde pour la conception de logiciels et de plateformes au service des besoins des collaborations mondiales. Ces outils sont également très prisés de la société et des secteurs industriels. Il est possible de créer une situation propice à une large adoption des logiciels et des plateformes au-delà du projet FCC en déterminant les conditions requises pour l'établissement de ces collaborations et en lançant des projets spécifiques de développement. La gestion collaborative d'événements, la création de documents, la communication (un à un ou un à plusieurs), le partage de fichiers, la gestion de l'information, les réseaux sociaux, les opérations à distance, la cybersécurité, l'informatique distribuée et le traitement des données sont autant d'exemples d'actions possibles. Le CERN et les États membres devraient garantir l'accès gratuit aux technologies développées aux utilisateurs ne faisant pas partie de la communauté de la physique des hautes énergies et de la physique des particules, et garantir la maintenance et l'amélioration à long terme de ces technologies. Ces logiciels et outils devraient être mis à disposition sur des plateformes permettant leur téléchargement et le suivi de leur installation. Le manque de données de ce type est considéré comme un des facteurs faisant obstacle à une estimation précise des impacts des technologies de l'information et de la communication.

**6) En ce qui concerne l'impact des entreprises dérivées, il convient de mettre en place une méthode systématique permettant d'assurer le suivi des entreprises créées par d'anciens participants au programme FCC, d'observer leur évolution au cours du temps et d'évaluer leur valeur économique.**

La création de nouvelles entreprises exploitant les connaissances acquises grâce au programme FCC représente un avantage important pour la société. La plupart du temps, la création d'entreprises dérivées s'appuie sur un ensemble de différentes compétences et expériences acquises par les participants plutôt que sur l'exploitation d'une technologie unique sous licence. Plus précisément, les technologies développées dans le cadre de projets collaboratifs de recherche et développement ne peuvent être attribuées seulement au CERN. De plus, actuellement, le CERN ne suit pas l'évolution des technologies de ses partenaires de collaboration. Un mécanisme systématique de suivi, sur la base du volontariat, est toutefois essentiel pour évaluer avec précision les avantages économiques et sociétaux créés. Ce cadre de suivi devrait faciliter une évaluation complète de l'impact des entreprises dérivées. Il pourrait comprendre la mise en place d'une base de données centralisée pour enregistrer les informations sur les

entreprises dérivées (fondateurs, pays, secteur d'activité, produits ou services proposés) et la possibilité de contacter régulièrement les créateurs d'entreprise afin d'obtenir des informations actualisées sur les progrès de leur activité.

**7) En ce qui concerne les impacts culturels, l'étude a mis en lumière l'importance des avantages économiques procurés par les visiteurs du CERN. Pour assurer un suivi durable de ce chemin d'impact, le CERN et la collaboration FCC devraient établir un cadre unifié pour recueillir en continu des données essentielles sur les visiteurs des expositions du CERN, des expériences et d'autres sites.**

Un mécanisme de suivi systématique des visiteurs est en effet nécessaire pour fournir des informations précises sur l'impact créé par les visiteurs se rendant sur place. Il serait demandé aux visiteurs de fournir quelques informations de base, parmi lesquelles leur pays d'origine, le mode de transport utilisé pour se rendre à Genève, l'objectif principal de leur visite, la durée du séjour, les dépenses effectuées pendant la visite et leurs commentaires sur les expositions et les sites visités (par exemple, leur niveau de satisfaction). La mise en œuvre de ce mécanisme permettrait d'assurer un suivi et une évaluation effectifs de l'impact culturel produit par les visiteurs qui se rendent sur place, ainsi que d'améliorer constamment l'expérience de ces derniers.

**8) La détermination et l'analyse des avantages environnementaux devraient être intensifiées.**

La détermination et l'analyse des avantages environnementaux est importante pour garantir l'acceptabilité sociale du projet et la neutralité carbone des activités scientifiques. À cette fin, il convient de nommer des experts économiques et environnementaux lors de la phase préparatoire du projet, sur le point de débiter, et de leur confier certains pouvoirs. Il est également nécessaire d'intensifier la coopération avec les partenaires industriels et les services des États hôtes afin de définir de manière fiable les avantages et les coûts environnementaux potentiels liés au projet. Outre la création de sources d'énergie renouvelable, le recours à la chaleur résiduelle et le réemploi de matériaux d'excavation, de nouvelles possibilités pourraient être mises au jour lors de nouvelles recherches et de discussions approfondies avec les parties prenantes du projet. Par exemple, les chemins d'impact liés à l'utilisation de l'eau, à la gestion des terres, à la préservation de la biodiversité et aux infrastructures de transport méritent un examen minutieux. L'évaluation des impacts négatifs potentiels sur l'environnement est tout aussi importante. La compréhension et l'atténuation d'effets négatifs tels que la pollution sont cruciales pour obtenir des résultats durables et garantir l'utilisation responsable des ressources naturelles.

**9) Le suivi constant de ce qu'il convient d'appeler la « valeur du bien commun » est considéré comme une approche adéquate pour justifier les investissements réalisés et garantir qu'ils correspondent aux attentes des bailleurs de fonds, c'est-à-dire, en définitive, les contribuables. Il conviendrait d'appliquer cette stratégie avec plus de vigueur au moyen d'enquêtes menées dans tous les pays susceptibles de financer le projet, réitérées régulièrement afin d'améliorer notre compréhension de la façon dont son acceptation sociale peut être préservée, voire renforcée.**

Dans le cadre de ce projet, un cadre visant à améliorer l'efficacité de ce processus a été élaboré. Il permet la poursuite des activités avec un financement supplémentaire minimale. L'extension du recueil de données à des pays n'ayant pas encore été étudiés peut apporter des informations sur les éléments qui influent sur la perception du programme FCC. Les résultats devraient être communiqués régulièrement à la Direction du CERN et au Conseil et faire l'objet de résumés destinés à être diffusés plus largement auprès de toutes les parties prenantes, y compris le grand public, sur les réseaux sociaux du CERN et ses principaux sites web, entre autres.