

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

## Volume 3, chapitre 4

# Développement durable

**Traduction française du chapitre 4, " Développement durable"**

La traduction de cette publication technique/scientifique a été réalisée à l'aide d'outils automatisés. Elle peut différer de la version originale en anglais à divers égards.

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

Soumis à la revue European Physical Journal ST, publication conjointe de EDP Sciences, de Springer Science+Business Media, et de la Società Italiana di Fisica.

## **Note de la rédaction**

L'une des recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules était que « l'Europe et ses partenaires internationaux étudient la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie au centre de masse d'au moins 100 TeV et avec une installation de productions d'électrons-positrons, d'interactions de Higgs et d'interactions électrofaibles dans une première étape ».

En juin 2021, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui doit être achevée d'ici 2025, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Les résultats de l'étude sont rendus publics dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC, en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, lancé par le Conseil du CERN en mars 2024. Les études présentées dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC n'impliquent aucun engagement de la part des États membres ou membres associés du CERN en faveur de la construction du futur collisionneur circulaire.

Le présent rapport et les hypothèses qu'il contient ne préjugent pas des analyses de faisabilité territoriale qui seront menées par les États hôtes, la France et la Suisse, ni des résultats de leurs débats publics et processus de concertation respectifs, ni des décisions futures de leurs autorités compétentes.

## Remerciements

Nous tenons à remercier les membres du Comité de pilotage international :

F. Gianotti (Président), CERN  
R. Bello, CERN  
P. Chomaz, CEA, France  
M. Cobal, INFN et Université d'Udine, Italie  
B. Heinemann, DESY, Allemagne  
T. Koseki, KEK, Japon  
M. Lamont, CERN  
L. Merminga, FNAL, États-Unis  
J. Mnich, CERN  
M. Seidel, PSI et EPFL, Suisse  
C. Warakaulle, CERN

et les membres du Comité consultatif scientifique :

A. Parker (Président), Université de Cambridge, Royaume-Uni  
R. Bartolini, DESY, Allemagne  
A. Chabert, SFTRF, France  
H. Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners LLC, Suisse  
B. Gavela Legazpi, UAM Madrid, Espagne  
G. Hiller, TU Dortmund, Allemagne  
S. Krishnagopal, FNAL, États-Unis  
P. Križan, Université de Ljubljana, Slovénie  
P. Lebrun, ESI, France  
P. McIntosh, STFC, ASTeC, UKRI, Royaume-Uni  
M. Minty, BNL, États-Unis  
R. Tenchini, INFN Sezione di Pisa, Italie

pour leurs conseils constants et leur révision minutieuse qui ont permis de mener à bien ce rapport.

Les recherches menées par la collaboration internationale pour le FCC, hébergée par le CERN, ont conduit à la présente publication et ont été financées par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous les numéros de subvention 951754 (FCCIS), 654305 (EuroCirCol), 764879 (EASITrain), 730871 (ARIES), 777563 (RI-Paths) et du FP7 sous le numéro 312453 (EuCARD-2).

Ce travail a également bénéficié du soutien de l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), fondée en 2016 en tant que collaboration faîtière pour les activités de recherche et de technologie portant sur les accélérateurs. Les partenaires actuels de CHART sont le CERN, l'Institut PSI, l'EPFL, l'ETH-Zurich et l'Université de Genève.

Avis concernant les marques : Toutes les marques commerciales figurant dans le présent rapport sont reconnues comme telles.

Le présent rapport a été édité avec le système collaboratif de rédaction et de publication Overleaf.com. La mise en page et la préparation finale de l'impression ont été réalisées avec pdfTeX 3.14159265-2.6-1.40.17.

Copyright CERN pour le bénéfice de la collaboration FCC 2024, Creative Commons Attribution 4.0

Le transfert de connaissances fait partie intégrante de la mission du CERN.

Le CERN publie ce volume en libre accès sous la licence Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) afin d'en permettre une large diffusion et utilisation. La soumission d'une contribution au serveur de documents du CERN est réputée valoir acceptation, de la part du contributeur, de la présente déclaration de droits d'auteur et de licence. Les contributeurs sont priés d'obtenir les autorisations éventuellement nécessaires à cette fin.

Le présent volume est indexé dans : Serveur de documents du CERN (CDS) :

CERN-FCC-ACC-2025-0003    DOI  
10.17181/CERN.I26X.V4VF

<http://cds.cern.ch/record/2928194>

La présente édition du rapport doit être citée de la façon suivante :

Rapport d'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire, Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité, édition préliminaire publiée par M. Benedikt et al, Rapports sur les accélérateurs du CERN,

CERN-FCC-ACC-2025-0003, DOI 10.17181/CERN.I26X.V4VF, Genève, 2025.

Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2928194>

## Liste des éditeurs au 31 mars 2025

M. Benedikt<sup>1</sup> (Chef d'étude), F. Zimmermann<sup>1</sup> (Chef d'étude adjoint), B. Auchmann<sup>1,2</sup>, W. Bartmann<sup>1</sup>, J.P. Burnet<sup>1</sup>, C. Carli<sup>1</sup>, A. Chancés, P. Craievich<sup>2</sup>, M. Giovannozzi<sup>1</sup>, C. Grojean<sup>4,5</sup>, J. Gutleber<sup>1</sup>, K. Hanke<sup>1</sup>, A. Henriques<sup>1</sup>, P. Janot<sup>1</sup>, C. Lourenço<sup>1</sup>, M. Mangano<sup>1</sup>, T. Otto<sup>1</sup>, J. Poole<sup>1</sup>, S. Rajagopalan<sup>6</sup>, T. Raubenheimer<sup>7</sup>, E. Todesco<sup>1</sup>, L. Ulrici<sup>1</sup>, T. Watson<sup>1</sup>, G. Wilkinson<sup>1,8</sup>.

## Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada<sup>9,10,11</sup>, M. Abbrescia<sup>12,13</sup>, H. Abdolmaleki<sup>14,15</sup>, S.H. Abidi<sup>6</sup>, A. Abramov<sup>1</sup>, C. Adam<sup>9,16,17</sup>, M. Ady<sup>1</sup>, P.R. Adzic<sup>18</sup>, I. Agapov<sup>4</sup>, D. Aguglia<sup>1</sup>, I. Ahmed<sup>19</sup>, M. Aiba<sup>2</sup>, G. Aielli<sup>20,21</sup>, T. Akan<sup>22</sup>, N. Akchurin<sup>23</sup>, D. Akturk<sup>24</sup>, M. Al-Thakeel<sup>1,25,26</sup>, G.L. Alberghi<sup>25</sup>, J. Alcaraz Maestre<sup>27</sup>, M. Aleksa<sup>1</sup>, R. Aleksan<sup>3</sup>, F. Alharthi<sup>9,10,28</sup>, J. Alimena<sup>4</sup>, A. Alimenti<sup>29</sup>, S. Alioli<sup>30,31</sup>, L. Alix<sup>1,9,16</sup>, B.C. Allanach<sup>32</sup>, L. Allwicher<sup>4</sup>, A.A. Altintas<sup>33</sup>, M. Altinli<sup>33,34</sup>, M. Alviggi<sup>35,36</sup>, G. Ambrosio<sup>37</sup>, Y. Amhis<sup>9,10,11</sup>, A. Amiri<sup>38,39</sup>, G. Ammirabile<sup>40</sup>, T. Andeen<sup>41</sup>, K.D.J. Andréi<sup>1</sup>, J. Andrea<sup>9,42,43</sup>, A. Andreazza<sup>44,45</sup>, M. Andreini<sup>1</sup>, T. Andriollo<sup>46</sup>, L. Angel<sup>47</sup>, M. Angelucci<sup>48</sup>, S. Antusch<sup>49</sup>, M.N. Anwar<sup>12,50</sup>, L. Apolinário<sup>51</sup>, G. Apollinari<sup>37</sup>, R.B. Appleby<sup>52,53</sup>, A. Apresyan<sup>37</sup>, Aram Apyan<sup>54</sup>, Armen Apyan<sup>55</sup>, A. Arbey<sup>9,56,57</sup>, B. Argiento<sup>35,36</sup>, V. Ari<sup>58</sup>, S. Arias<sup>59</sup>, B. Arias Alonso<sup>1</sup>, O. Arnaez<sup>9,16,17</sup>, R. Arnaldi<sup>60</sup>, F. Arneodo<sup>61</sup>, H. Arnold<sup>62</sup>, P. Arrutia Sota<sup>1</sup>, K. Arundell<sup>63</sup>, M.E. Ascioti<sup>64,65</sup>, K.A. Assamagan<sup>6</sup>, S. Aumiller<sup>66</sup>, G. Aydin<sup>67</sup>, K. Azizi<sup>38,68</sup>, P. Azzi<sup>69</sup>, N. Bacchetta<sup>69</sup>, A. Bacci<sup>44</sup>, B. Bai<sup>70</sup>, Y. Bai<sup>71</sup>, L. Balconi<sup>44,45</sup>, G. Baldinelli<sup>64,65</sup>, B. Balhan<sup>1</sup>, A.H. Ball<sup>1,72</sup>, A. Ballarino<sup>1</sup>, S. Banerjee<sup>73</sup>, S. Banik<sup>2,74</sup>, D.P. Barber<sup>4,75</sup>, M.B. Barbero<sup>9,76,77</sup>, D. Barducci<sup>40,78</sup>, D. Barna<sup>79</sup>, G.G. Barnaföldi<sup>79</sup>, M.J. Barnes<sup>1</sup>, A.J. Barr<sup>8</sup>, R. Bartek<sup>80</sup>, H. Bartosik<sup>1</sup>, S.A. Bass<sup>81</sup>, U. Bessler<sup>9,82,83</sup>, M.J. Basso<sup>84,85</sup>, A. Bastianin<sup>45,86</sup>, P. Bataillard<sup>87</sup>, M. Battistin<sup>1</sup>, J. Bauche<sup>1</sup>, L. Baudin<sup>1</sup>, J. Baudot<sup>9,42,43</sup>, B. Baudouy<sup>3</sup>, L. Bauerdick<sup>37</sup>, C. Bayindir<sup>88,89</sup>, H.P. Beck<sup>90</sup>, F. Bedeschi<sup>40</sup>, C. Bee<sup>62</sup>, M. Begel<sup>6</sup>, M. Behtouei<sup>48</sup>, L. Bellagamba<sup>25</sup>, N. Bellegarde<sup>1</sup>, E. Belli<sup>1,91</sup>, E. Bellingeri<sup>92</sup>, S. Belomestnykh<sup>37</sup>, A.D. Benaglia<sup>30</sup>, G. Bencivenni<sup>48</sup>, J. Bendavid<sup>1</sup>, M. Benmergui<sup>93</sup>, M. Benoit<sup>94</sup>, D. Benvenuti<sup>1,40</sup>, T. Bergauer<sup>95</sup>, N. Bernachot<sup>96</sup>, G. Bernardi<sup>9,97,98</sup>, J. Bernardi<sup>99</sup>, Q. Berthet<sup>100,101,102</sup>, S. Bertoni<sup>103</sup>, C. Bertulani<sup>104</sup>, M.I. Besana<sup>2</sup>, A. Besson<sup>9,42,43</sup>, M. Bettelini<sup>105</sup>, S. Bettoni<sup>2</sup>, S. Beuvier<sup>106</sup>, P.C. Bhat<sup>37</sup>, S. Bhattacharya<sup>107</sup>, J. Bhom<sup>108</sup>, M.E. Biagini<sup>48</sup>, A. Bibet-Chevalier<sup>109</sup>, M. Bicerl<sup>110</sup>, M. Biglietti<sup>111</sup>, G.M. Bilei<sup>64</sup>, B. Bilki<sup>112,113</sup>, K. Bisgaard Christensen<sup>1</sup>, T. Biswas<sup>114</sup>, F. Blanc<sup>115</sup>, F. Blekman<sup>4,116,117</sup>, A. Blondel<sup>9,102,118</sup>, J. Blümlein<sup>4</sup>, D. Boccanfuso<sup>35,119</sup>, A. Bogomyagkov<sup>120</sup>, P. Boillon<sup>109</sup>, P. Boivin<sup>101</sup>, M.J. Boland<sup>121</sup>, S. Bologna<sup>122</sup>, O. Bolukbasi<sup>33</sup>, R. Bonnet<sup>103</sup>, J. Borburgh<sup>1</sup>, F. Bordry<sup>1</sup>, P. Borges de Sousa<sup>1</sup>, G. Borghello<sup>1</sup>, L. Borriello<sup>35</sup>, D. Bortoletto<sup>8</sup>, M. Boscolo<sup>48</sup>, L. Bottura<sup>1</sup>, V. Boudry<sup>9,82,83</sup>, R. Boughezal<sup>123</sup>, D. Bourilkov<sup>124</sup>, M. Boyd<sup>84,125</sup>, D. Boye<sup>6</sup>, G. Bozzi<sup>126,127</sup>, V. Braccini<sup>92</sup>, C. Bracco<sup>1</sup>, B. Bradu<sup>1</sup>, A. Braghieri<sup>128</sup>, S. Braibant<sup>25,26</sup>, J. Bramante<sup>129</sup>, G.C. Branco<sup>130</sup>, R. Brenner<sup>131</sup>, N. Brisa<sup>103</sup>, D. Britzger<sup>132</sup>, G. Broggi<sup>1,91</sup>, L. Bromiley<sup>1</sup>, E. Brost<sup>6</sup>, Q. Bruant<sup>3</sup>, R. Bruce<sup>1</sup>, E. Bründermann<sup>133</sup>, L. Brunetti<sup>9,16,17</sup>, O. Brüning<sup>1</sup>, O. Brunner<sup>1</sup>, X. Buffat<sup>1</sup>, E. Bulyak<sup>134</sup>, A. Burdyko<sup>44,135</sup>, H. Burkhardt<sup>1,136</sup>, P.N. Burrows<sup>137</sup>, S. Busatto<sup>44,91</sup>, S. Buschaert<sup>87</sup>, D. Buttazzo<sup>40</sup>, A. Butterworth<sup>1</sup>, D. Butti<sup>1</sup>, G. Cacciapaglia<sup>138,139,140</sup>, Y. Cai<sup>7</sup>, B. Cai<sup>1141</sup>, V. Cairo<sup>1</sup>, O. Cakir<sup>58</sup>, P. Calafiura<sup>142</sup>, R. Calaga<sup>1</sup>, S. Calatroni<sup>1</sup>, D.G. Caldwell<sup>143</sup>, A. Çalışkan<sup>144</sup>, C. Calpini<sup>145</sup>, M. Calviani<sup>1</sup>, E. Camacho-Pérez<sup>146</sup>, P. Camarri<sup>20,21</sup>, L. Caminada<sup>2,74</sup>, M. Campajola<sup>35,36</sup>, A.C. Canbay<sup>58</sup>, K. Canderan<sup>1</sup>, S. Candido<sup>1</sup>, F. Canelli<sup>74</sup>, A. Canepa<sup>37</sup>, S. Cantarella<sup>48</sup>, K.B. Cantún-Avila<sup>146</sup>, L. Capriotti<sup>147,148</sup>, A. Carami<sup>149</sup>, A. Carbone<sup>44</sup>, J.M. Carceller<sup>1</sup>, G. Carini<sup>6</sup>, C. Carli<sup>1</sup>, F. Carlier<sup>1</sup>, C.M. Carloni Calame<sup>128</sup>, C. Caron<sup>150</sup>, F. Carra<sup>1</sup>, C. Cartannaz<sup>287</sup>, S. Casenove<sup>1</sup>, G. Catalano<sup>151</sup>, V. Cavaliere<sup>6</sup>, C. Cazzaniga<sup>152</sup>, C. Cecchi<sup>64,65</sup>, F.G. Celiberto<sup>153</sup>, M. Cepeda<sup>27</sup>, F. Cerutti<sup>1</sup>, F. Cetorelli<sup>30,31</sup>, G. Chachamis<sup>51</sup>, Y. Chae<sup>4</sup>, F. Chagnet<sup>154</sup>, I. Chaikovska<sup>9,10,11</sup>, M. Chalhoub<sup>87</sup>, M. Chamizo-Llatas<sup>6</sup>, M. Champagne<sup>155</sup>, H. Chanal<sup>9,156,157</sup>, G. Chapelier<sup>109</sup>, P. Charitos<sup>1</sup>, C. Charles<sup>106</sup>, T.K. Charles<sup>158</sup>, C. Charlot<sup>9,82,83</sup>, S. Chatterjee<sup>4</sup>, A. Chaudhuri<sup>159</sup>, R. Chehab<sup>9,10,11</sup>, S.V. Chekanov<sup>160</sup>, H. Chen<sup>6</sup>, T. Chesne<sup>106</sup>, F. Chiapponi<sup>25,26</sup>, G. Chiarello<sup>161,162</sup>, M. Chiesa<sup>128</sup>, P. Chiggiato<sup>1</sup>, Ph. Chomaz<sup>3</sup>, M. Chorowski<sup>163</sup>, J.P. Chou<sup>164</sup>, M. Chruszcz<sup>108</sup>, W. Chung<sup>165</sup>, S. Ciarlantini<sup>69,166</sup>, A. Ciarna<sup>48</sup>, D. Cieri<sup>132</sup>, A.K. Ciftci<sup>167</sup>, R. Ciftci<sup>168</sup>, R. Cimino<sup>48</sup>, F.

Cirotto<sup>35,36</sup>, M. Ciuchini<sup>111</sup>, M. Cobal<sup>169,170</sup>, A. Coccaro<sup>141</sup>, R. Coelho Lopes De Sa<sup>171</sup>, J.A. Coleman-Smith<sup>1</sup>, F. Collamati<sup>172</sup>, C. Colldelram<sup>173</sup>, P. Collier<sup>1</sup>, P. Collins<sup>1</sup>, J. Collot<sup>9,174,175</sup>, M. Colmenero<sup>1</sup>, L. Colnot<sup>151</sup>, G. Coloretti<sup>74</sup>, F.A. Conventi<sup>35,176</sup>, A. Cook<sup>1</sup>, L. Cooley<sup>177,178</sup>, A.S. Cornell<sup>179</sup>, C. Cornella<sup>1</sup>, G. Cornette<sup>106</sup>, I. Corredoira<sup>180</sup>, P. Costa Pinto<sup>1</sup>, F. Couderc<sup>3</sup>, J. Coupard<sup>1</sup>, S. Coussy<sup>87</sup>, R. Crescenzi<sup>181</sup>, I. Crespo Garrido<sup>1,182</sup>, T. Critchley<sup>1,102</sup>, A. Crivellin<sup>74</sup>, T. Croci<sup>64</sup>, C. Cudré<sup>106</sup>, G. Cummings<sup>37</sup>, F. Cuna<sup>12</sup>, R. Cunningham<sup>1</sup>, B. Curé<sup>1</sup>, E. Curtis<sup>183</sup>, M. D'Alfonso<sup>184</sup>, L. D'Aloia Schwartzentruber<sup>185</sup>, G. D'Amen<sup>6</sup>, B. D'Anzi<sup>12,13</sup>, A. D'Avanzo<sup>35,36</sup>, D. d'Enterria<sup>1</sup>, A. D'Onofrio<sup>35</sup>, M. D'Onofrio<sup>186</sup>, M. Da Col<sup>151</sup>, M. Da Rocha Rolo<sup>60</sup>, C. Dachauer<sup>187</sup>, B. Dagli<sup>24</sup>, A. Dainese<sup>69</sup>, B. Dalena<sup>3</sup>, W. Dallapiazza<sup>188</sup>, M. Dam<sup>189</sup>, H. Damerau<sup>1</sup>, V. Dao<sup>62</sup>, A. Das<sup>190</sup>, M.S. Daugaard<sup>1</sup>, S. Dauphin<sup>109</sup>, A. David<sup>1</sup>, T. Davídek<sup>191</sup>, G.J. Davies<sup>183</sup>, S. Dawson<sup>6</sup>, J. de Blas<sup>192</sup>, A. de Cosa<sup>152</sup>, S. De Curtis<sup>193</sup>, N. De Filippis<sup>12,50</sup>, E. De Lucia<sup>48</sup>, R. De Maria<sup>1</sup>, E. De Matteis<sup>44</sup>, A. De Roeck<sup>1</sup>, A. De Santis<sup>48</sup>, A. De Vita<sup>1,69,166</sup>, A. Deandrea<sup>9,56,57</sup>, C.J. Debono<sup>194</sup>, M. Deeb<sup>101</sup>, M.M. Defranchisi<sup>1</sup>, J. Degens<sup>186</sup>, S. Deghaye<sup>1</sup>, V. Del Duca<sup>48</sup>, C.L. Del Pio<sup>6</sup>, A. Del Vecchio<sup>91</sup>, D. Delikaris<sup>1</sup>, A. Dell'Acqua<sup>1</sup>, M. Della Pietra<sup>35,36</sup>, M. Delmastro<sup>9,16,17</sup>, L. Delprat<sup>1</sup>, E. Delugas<sup>151</sup>, Z. Demiragli<sup>195</sup>, L. Deniau<sup>1</sup>, D. Denisov<sup>6</sup>, H. Denizli<sup>196</sup>, A. Denner<sup>197</sup>, A. Denot<sup>109</sup>, G. Deptuch<sup>6</sup>, A. Desai<sup>198</sup>, H. Deveci<sup>1</sup>, A. Di Canto<sup>6</sup>, A. Di Ciaccio<sup>20,21</sup>, L. Di Ciaccio<sup>9,16,17</sup>, D. Di Croce<sup>1,115</sup>, C. Di Fraia<sup>35,36</sup>, B. Di Micco<sup>29,111</sup>, R. Di Nardo<sup>29,111</sup>, T.B. Dingley<sup>8</sup>, F. Djama<sup>9,76,77</sup>, F. Djurabekova<sup>199</sup>, D. Dockery<sup>37</sup>, S. Doebert<sup>1</sup>, D. Domange<sup>1,200</sup>, M. Donegà<sup>152</sup>, U. Dosselli<sup>69</sup>, H.A. Dostmann<sup>1,201</sup>, J.A. Dragovich<sup>37</sup>, I. Drebot<sup>44</sup>, M. Drewes<sup>202</sup>, T.A. du Pree<sup>203</sup>, Z. Duan<sup>204</sup>, C. Duarte-Galvan<sup>205</sup>, O. Duboc<sup>206</sup>, M. Duda<sup>2</sup>, P. Duda<sup>163</sup>, H. Duran Yildiz<sup>58</sup>, H. Durand<sup>106</sup>, P. Durand<sup>106</sup>, G. Durieux<sup>202</sup>, Y. Dutheil<sup>1</sup>, I. Dutta<sup>37</sup>, J.S. Dutta<sup>207</sup>, S. Dutta<sup>208</sup>, F. Duval<sup>1</sup>, F. Eder<sup>1</sup>, M. Eisterer<sup>99</sup>, Z. El Bitar<sup>9,42,43</sup>, A. El Saied<sup>209</sup>, M. Elisei<sup>44</sup>, J. Ellis<sup>1,210</sup>, W. Elmetenawee<sup>12</sup>, J. Elmsheuser<sup>6</sup>, V. Daniel Elvira<sup>37</sup>, S.C. Eno<sup>211</sup>, Y. Enomoto<sup>212</sup>, B.A. Erdelyi<sup>69,166</sup>, O.E. Eruteya<sup>102,213</sup>, M. Escobar<sup>214</sup>, O. Etisken<sup>215</sup>, I. Eymard<sup>145</sup>, J. Eysermans<sup>184</sup>, D. Falchieri<sup>25</sup>, C. Falkenberg<sup>206</sup>, F. Fallavollita<sup>1,132</sup>, A. Afalou<sup>1,9,10</sup>, J. Faltova<sup>191</sup>, J. Fanini<sup>1</sup>, L. Fanò<sup>64,65</sup>, K. Fanti<sup>106</sup>, R. Farinelli<sup>25</sup>, M. Farino<sup>165</sup>, S. Farinon<sup>141</sup>, H. Fatehi<sup>38</sup>, J. Fatterbert<sup>106</sup>, A. Faure<sup>216</sup>, A. Faus-Golfe<sup>9,10,11</sup>, G. Favia<sup>1</sup>, L. Favilla<sup>35,119</sup>, W.J. Fawcett<sup>32</sup>, A. Federowicz<sup>37</sup>, L. Felgion<sup>9,76,77</sup>, L. Felsberger<sup>1</sup>, Y. Feng<sup>23</sup>, A. Fernández Téllez<sup>217</sup>, R. Ferrari<sup>128</sup>, L. Ferreira<sup>1</sup>, F. Ferro<sup>141</sup>, M. Fiascaris<sup>1</sup>, C. Fiorio<sup>45</sup>, S.A. Fleury<sup>1</sup>, L. Florez<sup>188</sup>, M. Florio<sup>45,151</sup>, A. Fondacci<sup>64</sup>, B. Fontimpe<sup>214</sup>, K. Forazi<sup>1</sup>, R. Fortunati<sup>2</sup>, M. Foudaidy<sup>9,10,11</sup>, M. Fouaidy<sup>9,10,11</sup>, A. Foussati<sup>1</sup>, A. Fowler<sup>1</sup>, J.D. Fox<sup>218</sup>, M. Francesconi<sup>35</sup>, B. Francois<sup>1</sup>, R. Franqueira Ximenes<sup>1</sup>, F. Fransesini<sup>48</sup>, A. Frasca<sup>1,186</sup>, A. Freitas<sup>219</sup>, J.A. Frost<sup>8</sup>, K. Furukawa<sup>212</sup>, A. Gabrielli<sup>25,26</sup>, A. Gaddi<sup>1</sup>, F. Gaede<sup>4</sup>, A. Gallén<sup>131</sup>, R. Galler<sup>220,221</sup>, E. Gallice<sup>106</sup>, E. Gallo<sup>4,116</sup>, H. Gamper<sup>1</sup>, G. Ganis<sup>1</sup>, S. Ganjour<sup>3</sup>, S. Gao<sup>6</sup>, A. Garandi<sup>149</sup>, C. Garaus<sup>206</sup>, D. Garcia<sup>1</sup>, R. García Alía<sup>1</sup>, R. García Gil<sup>222</sup>, C.M. Garcia Jaimes<sup>1,115</sup>, H. Garcia Rodrigues<sup>2,223</sup>, C. Garion<sup>1</sup>, M. Garlaschè<sup>1</sup>, D. Garnier<sup>154</sup>, M.V. Garzelli<sup>116</sup>, S. Gascon-Shotkin<sup>9,56,57</sup>, M. Gasior<sup>1</sup>, G. Gaudino<sup>35,119</sup>, G. Gaudio<sup>128</sup>, V. Gaur<sup>224</sup>, K. Gautam<sup>74,117</sup>, V. Gawas<sup>1</sup>, T. Gehrman<sup>74</sup>, A. Gehrman-De Ridder<sup>74,152</sup>, K. Geiger<sup>1</sup>, M. Genco<sup>151</sup>, F. Gerigk<sup>1</sup>, H. Gerwig<sup>1</sup>, A. Ghribi<sup>1,9,225</sup>, P. Giacomelli<sup>25</sup>, S. Giagu<sup>91,172</sup>, E. Gianfelice<sup>37</sup>, S. Giappichini<sup>133</sup>, D. Gibellieri<sup>1,226</sup>, F. Giffoni<sup>151</sup>, G. Gil da Silveira<sup>227</sup>, S.S. Gilardoni<sup>1</sup>, M. Giovannetti<sup>48</sup>, T. Girardet<sup>106</sup>, S. Girod<sup>1,106</sup>, P. Giubellino<sup>60</sup>, P. Giubilato<sup>69,166</sup>, F. Giuli<sup>20,21</sup>, M. Giuliani<sup>103</sup>, E.L. Gkoukousis<sup>1,74</sup>, S. Glukhov<sup>228</sup>, J. Gluza<sup>229</sup>, B. Goddard<sup>1</sup>, C. Goffing<sup>1,133</sup>, D. Goldsworthy<sup>1</sup>, T. Golling<sup>102</sup>, R. Gonçalo<sup>51,230</sup>, V.P. Gonçalves<sup>47,231</sup>, T. Gonçalves Da Silva<sup>214</sup>, J. Gonski<sup>7</sup>, R. Gonzalez Suarez<sup>131</sup>, S. Gorgi Zadeh<sup>1</sup>, S. Gori<sup>232</sup>, E. Gorini<sup>161,233</sup>, L. Gouskos<sup>234</sup>, M. Gouzevitch<sup>9,56,57</sup>, E. Granados<sup>1</sup>, F. Grancagnolo<sup>161</sup>, S. Grancagnolo<sup>161,233</sup>, A. Grassellino<sup>37</sup>, A. Grau<sup>133</sup>, E. Graverini<sup>40,78,115</sup>, F.G. Gravili<sup>161,233</sup>, H.M. Gray<sup>142,235</sup>, M. Grazzini<sup>74</sup>, Mario Greco<sup>29,111</sup>, Michela Greco<sup>60,236</sup>, A. Greljo<sup>49</sup>, J.-L. Grenard<sup>1</sup>, A.V. Gritsan<sup>237</sup>, R. Gröber<sup>69,166</sup>, A. Grudiev<sup>1</sup>, E. Gschwendtner<sup>1</sup>, J. Gu<sup>238</sup>, D. Guadagnoli<sup>17,138,239</sup>, G. Guerrieri<sup>1</sup>, A. Guiavarch<sup>209</sup>, G. Guillermo Canton<sup>1,240</sup>, M. Guinchard<sup>1</sup>, Y.O. Günaydin<sup>241</sup>, K. Gurcel<sup>93</sup>, L.X. Gutierrez Guerrero<sup>242,243</sup>, D. Gutiérrez Rueda<sup>1</sup>, A. Gutiérrez-Rodríguez<sup>244</sup>, V. Guzey<sup>199,245</sup>, C. Haber<sup>142</sup>, T. Hacheny<sup>246</sup>, B. Hacıahinoglu<sup>33</sup>, K. Hahn<sup>123</sup>, J. Hajer<sup>130</sup>, T. Hakulinen<sup>1</sup>, J.C. Hammersley<sup>247</sup>, M. Hance<sup>232</sup>, J.B. Hansen<sup>189</sup>, B. Härer<sup>133</sup>, E. Hauzinger<sup>220</sup>, M. Haviernik<sup>191</sup>, B. Hegner<sup>1</sup>, C. Helsen<sup>115</sup>, Ana Henriques<sup>1</sup>, C. Hernalsteens<sup>1</sup>, H. Hernández-Arellano<sup>217</sup>, R.J. Hernández-Pinto<sup>205</sup>, M.A. Hernández-Ruíz<sup>244</sup>, J. Hernández-Sánchez<sup>217</sup>, J.W. Heron<sup>1</sup>, L.M. Herrmann<sup>1</sup>, R. Hirosky<sup>248</sup>,

J.F. Hirschauer<sup>37</sup>, J.D. Hobbs<sup>62</sup>, S. Höche<sup>37</sup>, M. Hofer<sup>1</sup>, G. Hoffstaetter<sup>6,249</sup>, W. Höfle<sup>1</sup>, M. Hohlmann<sup>250</sup>, F. Holdener<sup>251</sup>, B. Holzer<sup>1</sup>, C.G. Honorato<sup>217</sup>, H. Hoorani<sup>252</sup>, A. Houver<sup>106</sup>, E. Howling<sup>1,8,137</sup>, X. Huang<sup>7</sup>, F. Hug<sup>253</sup>, B. Humann<sup>1</sup>, P. Hunchak<sup>121</sup>, Y. Husein<sup>1</sup>, A. Hussain<sup>1,254</sup>, G. Iadarola<sup>1</sup>, G. Iakovidis<sup>6</sup>, G. Iaselli<sup>12,50</sup>, P. Iengo<sup>35</sup>, A. Ilg<sup>74</sup>, M. Iodice<sup>111</sup>, A.O.M. Iorio<sup>35,36</sup>, V. Ippolito<sup>172</sup>, U. Iriso<sup>173</sup>, J. Isaacson<sup>37</sup>, G. Isidori<sup>74</sup>, R. Islam<sup>255</sup>, A. Istepanyan<sup>106</sup>, S. Izquierdo Bermudez<sup>1</sup>, V. Izzo<sup>35</sup>, P.D. Jackson<sup>198</sup>, R. Jafari<sup>1,38</sup>, S.S. Jagabathuni<sup>1,102</sup>, S. Jana<sup>256,257</sup>, C. Järmyr Eriksson<sup>1</sup>, P. Jausserand<sup>154</sup>, M. Jensen<sup>258</sup>, J.M. Jimenez<sup>1</sup>, F.R. Joaquim<sup>130</sup>, O.R. Jones<sup>1</sup>, J. Joos<sup>109</sup>, E. Jourd’huy<sup>9,259</sup>, E. Jourdan<sup>214</sup>, J.M. Jowett<sup>1,260</sup>, A. Jueid<sup>261</sup>, A.W. Jung<sup>207</sup>, M. Kagan<sup>7</sup>, I. Kahraman<sup>58</sup>, V. Kaini<sup>1</sup>, J. Kalinowski<sup>262</sup>, J.F. Kamenik<sup>263,264</sup>, A. Kanso<sup>265</sup>, T. Kar<sup>266</sup>, S.O. Kara<sup>267</sup>, H. Karadeniz<sup>268</sup>, S.R. Karmarkar<sup>207</sup>, V. Karpati<sup>269</sup>, I. Karpov<sup>1</sup>, M. Karppinen<sup>1</sup>, P. Karst<sup>9,76,77</sup>, S. Kartal<sup>33</sup>, V.V. Kashikhin<sup>37</sup>, U. Kaya<sup>58</sup>, A. Kehagias<sup>1,270</sup>, J. Keintzel<sup>1</sup>, M. Kennouche<sup>1</sup>, M. Kenzie<sup>32</sup>, M. Kerréveur-Lavaud<sup>46</sup>, R. Kersevan<sup>1,271</sup>, V. Keus<sup>199,272</sup>, H. Khanpour<sup>14,273,274</sup>, V.V. Khoze<sup>275</sup>, V.A. Khoze<sup>275</sup>, P. Kicsiny<sup>1</sup>, R. Kieffer<sup>1</sup>, C. Kiel<sup>115</sup>, J. Kieseler<sup>133</sup>, A. Kilic<sup>276</sup>, B. Kilminster<sup>74</sup>, S. Kim<sup>277</sup>, Z. Kirca<sup>276</sup>, M. Klein<sup>186</sup>, A. Klimentov<sup>6</sup>, M. Klute<sup>133</sup>, V. Klyukhin<sup>120,278</sup>, M. Knecht<sup>138,279,280</sup>, B. Kniehl<sup>116</sup>, P. Ko<sup>281</sup>, S. Ko<sup>1</sup>, F. Kocak<sup>276</sup>, T. Koffas<sup>282</sup>, C. Kokkinos<sup>283,284</sup>, K. Kołodziej<sup>229</sup>, K. Kong<sup>285</sup>, P. Kontaxakis<sup>102</sup>, I.A. Koop<sup>120</sup>, P. Kopciwicz<sup>1</sup>, P. Koppenburg<sup>203</sup>, M. Koratzinos<sup>1,2</sup>, K. Kordas<sup>286</sup>, A. Korsun<sup>9,10,11</sup>, O. Kortner<sup>132</sup>, S. Kortner<sup>132</sup>, B. Korzh<sup>102</sup>, T. Koseki<sup>212</sup>, J. Kosse<sup>2</sup>, P. Kostka<sup>1,186</sup>, S. Kostoglou<sup>1</sup>, A.V. Kotwal<sup>81</sup>, G. Kozlov<sup>1,278</sup>, I. Kozsar<sup>1</sup>, T. Kramer<sup>1</sup>, P. Krkotic<sup>1</sup>, H. Kroha<sup>132</sup>, K. Kröniger<sup>246</sup>, S. Kuday<sup>1,58</sup>, G. Kuhlmann<sup>287</sup>, O. Kuhlmann<sup>1,288</sup>, M. Kuhn<sup>289</sup>, A. Kulesza<sup>290</sup>, M. Kumar<sup>291</sup>, F. Kurian<sup>6</sup>, A. Kurtulus<sup>1,152</sup>, T.H. Kwok<sup>74</sup>, S. La Mendola<sup>1</sup>, M. Lackner<sup>99,292</sup>, T. Ładzinski<sup>1</sup>, D. Lafarge<sup>1</sup>, P. Laïdouni<sup>1</sup>, G. Lamanna<sup>9,16,17</sup>, N. Lamas<sup>19</sup>, G. Landsberg<sup>234</sup>, C. Lange<sup>2</sup>, D.J. Lange<sup>165</sup>, A. Langner<sup>1</sup>, A.J. Lankford<sup>293</sup>, M.S. Larson<sup>294</sup>, K. Lasocha<sup>1</sup>, A. Latina<sup>1</sup>, S. Lauciani<sup>48</sup>, M. Laufenberg<sup>106</sup>, G. Lavezzari<sup>1</sup>, L. Lavezzi<sup>60</sup>, L. Lavezzo<sup>1</sup>, M. Le Garrec<sup>1,9,16</sup>, A. Le Jeune<sup>103</sup>, Ph. Lebrun<sup>1,295</sup>, Y. Léchevin<sup>1</sup>, A. Lechner<sup>1</sup>, E. Lecointe<sup>106</sup>, J.S.H. Lee<sup>296</sup>, S.W. Lee<sup>297</sup>, S.J. Lee<sup>281,298</sup>, T. Lefevre<sup>1</sup>, C. Leggett<sup>142</sup>, T. Lehtinen<sup>299</sup>, S. Leone<sup>40</sup>, C. Leonidopoulos<sup>300</sup>, S. Leontsinis<sup>74</sup>, G. Leprince-Maillère<sup>301</sup>, G. Lerner<sup>1</sup>, O. Leroy<sup>9,76,77</sup>, T. Lesiak<sup>108</sup>, P. Levai<sup>79</sup>, A. Leveratto<sup>92</sup>, R. Levi<sup>154</sup>, A. Li<sup>6</sup>, S. Li<sup>302,303</sup>, D. Liberati<sup>304</sup>, G.L. Lichtenstein<sup>47</sup>, M. Liepe<sup>249</sup>, Z. Ligeti<sup>142</sup>, H. Lin<sup>305</sup>, S. Linda<sup>145</sup>, E. Lipeles<sup>306</sup>, Z. Liu<sup>307</sup>, S.M. Liuzzo<sup>308</sup>, T. Loeliger<sup>289</sup>, A. Loeschcke Centeno<sup>309</sup>, A. Lorenzetti<sup>74</sup>, C. Lorin<sup>3</sup>, R. Losito<sup>1</sup>, M. Louka<sup>12,310</sup>, M.L. Loureiro García<sup>182</sup>, I. Low<sup>123,160</sup>, K. Lubonis<sup>154</sup>, M.T. Lucchini<sup>30,31</sup>, V. Lukashenko<sup>74</sup>, G. Luminati<sup>48</sup>, A.J.G. Lunt<sup>1,311</sup>, A. Lusiani<sup>40,312</sup>, M. Luzum<sup>313</sup>, H. Ma<sup>6</sup>, A. Maas<sup>314</sup>, E. Macchia<sup>1,91,172</sup>, A. Macchiolo<sup>74</sup>, G.E. Machinet<sup>265</sup>, R. Madar<sup>9,156,157</sup>, T. Madlener<sup>4</sup>, C. Madrid<sup>23</sup>, A. Magalotti<sup>29</sup>, M. Maggiora<sup>60,236</sup>, A.-M. Magnan<sup>183</sup>, M.A. Mahmoud<sup>315</sup>, Y. Mahmoud<sup>316,317</sup>, F. Mahmoudi<sup>1,9,56</sup>, H. Mainaud Durand<sup>1</sup>, J. Maitre<sup>109</sup>, Y. Makhloufi<sup>102</sup>, B. Malaescu<sup>9,118,318</sup>, A. Malagoli<sup>92</sup>, C.H. Malan<sup>109</sup>, M. Malekhosseini<sup>38</sup>, M. Malekhosseini<sup>38</sup>, A. Maloizel<sup>1,97,98</sup>, S. Malvezzi<sup>30</sup>, A. Malzac<sup>149</sup>, G. Manco<sup>128</sup>, L.S. Mandacarú Guerra<sup>165</sup>, P. Manfrinetti<sup>92,319</sup>, E. Manoni<sup>64</sup>, J. Mans<sup>307</sup>, L. Mantani<sup>320</sup>, S. Manzoni<sup>1</sup>, L. Marafatto<sup>169</sup>, C. Marcel<sup>1</sup>, T. Marcel<sup>110</sup>, R. Marchevski<sup>115</sup>, G. Marchioro<sup>9,97,98</sup>, F. Mariani<sup>44,91</sup>, V. Mariani<sup>64,65</sup>, S. Marin<sup>1</sup>, C. Marinas<sup>320</sup>, V. Marinozzi<sup>37</sup>, S. Mariotto<sup>44,45</sup>, C. Marquis<sup>106</sup>, J. Martelain<sup>321</sup>, G. Martelli<sup>64,65</sup>, A. Martens<sup>9,10,11</sup>, I. Martin-Melero<sup>1</sup>, V.I. Martinez Outschoorn<sup>171</sup>, F. Martinez<sup>217</sup>, C.M. Jardim<sup>27</sup>, L. Marzola<sup>322,323</sup>, S. Masciocchi<sup>260,266</sup>, A. Mashal<sup>14</sup>, A. Masi<sup>1</sup>, I. Masina<sup>147,148</sup>, P. Mastrapasqua<sup>202</sup>, V. Mateu<sup>324</sup>, S. Mattiazzo<sup>69,166</sup>, M. Maugis<sup>103</sup>, D. Mauree<sup>145</sup>, G.H.I. Maury-Cuna<sup>325</sup>, A. Mayoux<sup>1</sup>, E. Mazzeo<sup>1</sup>, S. Mazzoni<sup>1</sup>, M. McCullough<sup>1</sup>, M. Meena<sup>9,42,43</sup>, E. Meftah<sup>102</sup>, Andrew Mehta<sup>186</sup>, Ankita Mehta<sup>1</sup>, B. Mele<sup>172</sup>, R. Mena-Andrade<sup>1</sup>, M. Mentink<sup>1</sup>, D. Mergelkuhl<sup>1</sup>, V. Mertinger<sup>269</sup>, L. Mether<sup>1</sup>, S. Meylan<sup>106</sup>, T. Michel<sup>103</sup>, T. Michlmayr<sup>2</sup>, M. Migliorati<sup>91,172</sup>, A. Milanese<sup>1</sup>, C. Milardi<sup>48</sup>, G. Milhano<sup>51</sup>, C. Mirabelli<sup>326</sup>, T. Miralles<sup>9,156,157</sup>, L. Miralles Verge<sup>1</sup>, D. Mirarchi<sup>1</sup>, K. Mirbaghestan<sup>74</sup>, N. Mirian<sup>4,327</sup>, V.A. Mitsou<sup>320</sup>, D.S. Mitzel<sup>246</sup>, M. Mlynarikova<sup>1</sup>, S. Möbius<sup>90</sup>, M. Mohammadi Najafabadi<sup>1,14</sup>, G.B. Mohanty<sup>328</sup>, R. N. Mohapatra<sup>211</sup>, S. Moneta<sup>64</sup>, P.F. Monni<sup>1</sup>, E. Monnier<sup>9,76,77</sup>, S. Monteil<sup>9,156,157</sup>, I. León Monzón<sup>205</sup>, F. Moortgat<sup>1,329</sup>, N. Morange<sup>9,10,11</sup>, M. Moretti<sup>147,148</sup>, S. Moretti<sup>72</sup>, T. Mori<sup>1,212</sup>, I. Morozov<sup>120</sup>, A. Morozzi<sup>64</sup>, M. Morrone<sup>1</sup>, A. Moscariello<sup>102</sup>, F. Moscatelli<sup>64,330</sup>, I. Moulin<sup>216</sup>, N. Mounet<sup>1</sup>, A. Mueller<sup>331</sup>, A.-S. Müller<sup>133</sup>, B.O. Müller<sup>287</sup>, J. Mundet<sup>222</sup>, E. Musa<sup>1,4</sup>, V. Musati<sup>8</sup>, R. Musenich<sup>141</sup>, E. Musumeci<sup>320</sup>, M. Mylona<sup>1</sup>, V.V. Mytrochenko<sup>9,10,134</sup>, B. Nachman<sup>142</sup>, T. Nakamoto<sup>212</sup>, M. Napsuciale<sup>325</sup>, M.

Nardecchia<sup>91,172</sup>, G. Nardini<sup>332</sup>, G. Narváez-Arango<sup>333</sup>, S. Naseem<sup>61</sup>, A. Navascues, Cornago<sup>1</sup>, B. Naydenov<sup>1</sup>, G. Nergiz<sup>1</sup>, A.V. Nesterenko<sup>278</sup>, C. Neubüser<sup>334</sup>, H.B. Newman<sup>335</sup>, F. Niccoli<sup>1,336</sup>, O. Nicrosini<sup>128</sup>, U. Niedermayer<sup>228</sup>, G. Niehues<sup>133</sup>, J. Nielsen<sup>1</sup>, G. Nigrelli<sup>1,91,172</sup>, S. Nikitin<sup>120</sup>, I.B. Nikolaev<sup>120</sup>, A. Nisati<sup>172</sup>, N. Nitika<sup>169,170</sup>, J.M. No<sup>337</sup>, M. Nonis<sup>1</sup>, Y. Nosochkov<sup>7</sup>, A. Novokhatski<sup>1,7</sup>, J.M. O'Callaghan<sup>338</sup>, S.A. Ochoa-Oregon<sup>205</sup>, K. Ohmi<sup>204,212</sup>, K. Oide<sup>1,102,212</sup>, V.A. Okorokov<sup>120</sup>, C. Oleari<sup>30,31</sup>, D. Oliveira Damazio<sup>1,6</sup>, Y. Onel<sup>113</sup>, A. Onofre<sup>339,340,341</sup>, P. Osland<sup>342</sup>, T. Otto<sup>1</sup>, Y.M. Oviedo-Torres<sup>343,344,345</sup>, A. Ozansoy<sup>58</sup>, F. Ozaydin<sup>88,346</sup>, K. Ozdemir<sup>347</sup>, A. Ozturk<sup>1</sup>, M.A. Pérez de León<sup>205</sup>, S. Pacetti<sup>64,65</sup>, H. Pacey<sup>8</sup>, J. Paciello<sup>109</sup>, C.E. Pagliarone<sup>348,349</sup>, A. Paillex<sup>106</sup>, H.F. Pais da Silva<sup>1</sup>, F. Palla<sup>40</sup>, A. Pampaloni<sup>141</sup>, C. Pancotti<sup>151</sup>, M. Pandurovic<sup>350</sup>, O. Panella<sup>64</sup>, G. Panizzo<sup>169,170</sup>, C. Pantouvakis<sup>69,166</sup>, L. Panwar<sup>9,118,318</sup>, P. Paolucci<sup>35</sup>, Y. Papa<sup>106</sup>, A. Papaefstathiou<sup>351</sup>, Y. Papaphilippou<sup>1</sup>, A. Paramonov<sup>160</sup>, A. Paretii<sup>128,352</sup>, B. Parker<sup>6</sup>, V. Parma<sup>1</sup>, F. Parodi<sup>141,319</sup>, M. Parodi<sup>1</sup>, B. Paroli<sup>44,45</sup>, J.A. Parsons<sup>353</sup>, D. Passarelli<sup>37</sup>, D. Passeri<sup>64,65</sup>, B. Pattnaik<sup>320</sup>, A. Patwa<sup>354</sup>, C. Paus<sup>184</sup>, F. Pauss<sup>152</sup>, F. Peauger<sup>1</sup>, I. Pedraza<sup>217</sup>, R. Pedro<sup>51</sup>, J. Pekkanen<sup>1</sup>, G. Peoni<sup>1</sup>, A. Perez<sup>110</sup>, E. Perez<sup>1</sup>, F. Pérez<sup>173</sup>, J.C. Perez<sup>1</sup>, J.M. Pérez<sup>27</sup>, R. Perez-Ramos<sup>138,139,355</sup>, G. Pérez Segurana<sup>1</sup>, A. Perillo Marcone<sup>1</sup>, S. Perna<sup>35,36</sup>, K. Peters<sup>4</sup>, S. Petracca<sup>35,356</sup>, A.R. Petri<sup>44</sup>, F. Petriello<sup>123</sup>, A. Petrovic<sup>1</sup>, L. Pezzotti<sup>25</sup>, G. Piacquadio<sup>62</sup>, G. Piazza<sup>181</sup>, A. Piccini<sup>1</sup>, F. Piccinini<sup>128</sup>, A. Pich<sup>320</sup>, T. Pieloni<sup>115</sup>, J. Pierlot<sup>1</sup>, A.D. Pilkington<sup>52</sup>, M. Pillet<sup>326</sup>, M. Pinamonti<sup>169,170</sup>, N. Pinto<sup>237</sup>, L. Pintucci<sup>169,170</sup>, F. Pinzauti<sup>1</sup>, K. Piotrkowski<sup>273</sup>, C. Pira<sup>48</sup>, M. Pitti<sup>1</sup>, R. Pittau<sup>192</sup>, S. Pittet<sup>1</sup>, P. Placidi<sup>64,65</sup>, W. Płaczek<sup>357</sup>, S. Plätzer<sup>314,358</sup>, M.-A. Pleier<sup>6</sup>, E. Ploerer<sup>74,117</sup>, H. Podlech<sup>359,360</sup>, F. Poirier<sup>9,16,17</sup>, G. Polesello<sup>128</sup>, M. Poli Lener<sup>48</sup>, J. Polinski<sup>163</sup>, Z. Polonsky<sup>74</sup>, N. Pompeo<sup>29</sup>, M. Pont<sup>173</sup>, G. Alexandru-Popeneciu<sup>361</sup>, W. Porod<sup>197</sup>, L. Porta<sup>1</sup>, L. Portales<sup>3</sup>, T. Portaluri<sup>309</sup>, M.A.C. Potenza<sup>45</sup>, C. Prasse<sup>287</sup>, E. Premat<sup>185</sup>, M. Presilla<sup>133</sup>, S. Prestemon<sup>142</sup>, A. Price<sup>357</sup>, M. Primavera<sup>161</sup>, R. Principe<sup>1</sup>, M. Prioli<sup>44</sup>, F.M. Procacci<sup>12</sup>, E. Proserpio<sup>44,135</sup>, A. Provino<sup>92,319</sup>, C. Pueyo<sup>1</sup>, T. Puig<sup>19</sup>, N. Pukhaeva<sup>278</sup>, S. Pulawski<sup>229</sup>, G. Punzi<sup>40,78</sup>, A. Pyarelal<sup>362</sup>, J. Qian<sup>305</sup>, H. Quack<sup>363</sup>, F. S. Queiroz<sup>47</sup>, G. Quintas-Neves<sup>301</sup>, H. Rafique<sup>72</sup>, J.-Y. Raguin<sup>2</sup>, J. Raidal<sup>322</sup>, M. Raidal<sup>322</sup>, P. Raimondi<sup>37</sup>, A. Rajabi<sup>4</sup>, S. Ramírez-Urbe<sup>205</sup>, S. Randles<sup>186</sup>, T. Rao<sup>6</sup>, C.Ø. Rasmussen<sup>6</sup>, A. Ratkus<sup>364</sup>, P.N. Ratoff<sup>53,365</sup>, P. Razis<sup>366,367</sup>, P. Rebello Teles<sup>1,368</sup>, M.N. Rebelo<sup>130</sup>, M. Reboud<sup>9,10,11</sup>, S. Redaelli<sup>1</sup>, C. Regazzoni<sup>106</sup>, L. Reichenbach<sup>1,369</sup>, M. Reissig<sup>133</sup>, E. Renou<sup>106</sup>, A. Rentería-Olivo<sup>320</sup>, J. Reuter<sup>4</sup>, S. Rey<sup>106</sup>, A. Ribon<sup>1</sup>, D. Ricci<sup>1</sup>, M. Rignanese<sup>69,166</sup>, S. Rimjaem<sup>370</sup>, R.A. Rimmer<sup>371</sup>, R. Rinaldesi<sup>1</sup>, L. Rinolfi<sup>1,295</sup>, O. Rios<sup>1</sup>, G. Ripellino<sup>131</sup>, B. Rivas<sup>372</sup>, A. Rivetti<sup>60</sup>, T. Robens<sup>373</sup>, F. Robert<sup>185</sup>, E. Robutti<sup>141</sup>, C. Roderick<sup>1</sup>, G. Rodrigo<sup>320</sup>, M. Rodríguez-Cahuantzi<sup>217</sup>, L. Röhrig<sup>156,157,246</sup>, M. Roig<sup>374</sup>, F. Rojat<sup>109</sup>, J. Rojo<sup>203,375</sup>, J. Roloff<sup>234</sup>, P. Roloff<sup>1</sup>, A. Romanenko<sup>37</sup>, A. Romero Francia<sup>1</sup>, H. Romeyer<sup>376</sup>, N. Rompotis<sup>186</sup>, N. Rongieras<sup>103</sup>, G. Rosaz<sup>1</sup>, K. Roslon<sup>377</sup>, M. Rossetti Conti<sup>44</sup>, A. Rossi<sup>64,65</sup>, E. Rossi<sup>35,36</sup>, L. Rossi<sup>44,45</sup>, A.N. Rossia<sup>69,166</sup>, S. Rostami<sup>38</sup>, G. Roy<sup>1</sup>, B. Rubik<sup>37</sup>, I. Ruehl<sup>1</sup>, A. Ruiz-Jimeno<sup>378</sup>, R. Ruprecht<sup>133</sup>, J.P. Rutherford<sup>362</sup>, L. Rygaard<sup>4</sup>, M.S. Ryu<sup>297</sup>, L. Sabato<sup>1,115</sup>, G. Sadowski<sup>9,42,43</sup>, D. Saez de Jauregui<sup>133,379</sup>, M. Sahin<sup>380</sup>, A. Sailer<sup>1</sup>, M. Saito<sup>381</sup>, P. Saiz<sup>1</sup>, G.P. Salam<sup>382,383</sup>, R. Salerno<sup>9,82,83</sup>, T. Salmi<sup>299</sup>, B. Salvachua<sup>1</sup>, J.P.T. Salvesen<sup>1,8,137</sup>, B. Salvi<sup>301</sup>, D. Sampsonidis<sup>286</sup>, Y. Villamizar<sup>138,139,140</sup>, C. Sandoval<sup>333</sup>, S. Sanfilippo<sup>2</sup>, E. Santopinto<sup>141</sup>, R. Santoro<sup>44,135</sup>, X. Sarasola<sup>115</sup>, L. Sarperi<sup>289</sup>, I.H. Sarpün<sup>384</sup>, S. Sasikumar<sup>1</sup>, M. Sauvain<sup>385</sup>, A. Savoy-Navarro<sup>3,9</sup>, R. Sawada<sup>381</sup>, G. Sborlini<sup>386</sup>, J. Scamardella<sup>35,36</sup>, M. Schaer<sup>2</sup>, M. Schumann<sup>1,4</sup>, M. Schenk<sup>1</sup>, C. Scheuerlein<sup>1</sup>, C. Schiavi<sup>141,319</sup>, A. Schloegelhofer<sup>1</sup>, D. Schoerling<sup>1</sup>, A. Schöning<sup>266</sup>, S. Schramm<sup>102</sup>, D. Schulte<sup>1</sup>, P. Schwaller<sup>253,387</sup>, A. Schwartzman<sup>7</sup>, Ph. Schwemling<sup>3</sup>, R. Schwienhorst<sup>388</sup>, A. Sciandra<sup>6</sup>, L. Scibile<sup>1</sup>, I. Scimemi<sup>389</sup>, E. Scomparin<sup>60</sup>, C. Sebastiani<sup>1</sup>, B. Seeber<sup>390</sup>, J.T. Seeman<sup>7</sup>, F. Sefkow<sup>4</sup>, M. Seidel<sup>2,115</sup>, S. Seidel<sup>75</sup>, J. Seixas<sup>341,391,392</sup>, N. Selimovic<sup>69</sup>, M. Selvaggi<sup>1</sup>, C. Senatore<sup>102</sup>, A. Senol<sup>196</sup>, N. Serra<sup>74</sup>, A. Seryi<sup>371</sup>, A. Sfyrli<sup>102</sup>, Pramond Sharma<sup>393</sup>, Punit Sharma<sup>6</sup>, C.J. Sharp<sup>1</sup>, L. Shchutka<sup>115</sup>, V. Shiltsev<sup>394</sup>, M. Siano<sup>44,45</sup>, R. Sierra<sup>1</sup>, E. Silva<sup>29</sup>, R.C. Silva<sup>47,345</sup>, L. Silvestrini<sup>172</sup>, F. Simon<sup>133</sup>, G. Simonetti<sup>1</sup>, R. Simoniello<sup>1</sup>, B.K. Singh<sup>395</sup>, S. Singh<sup>6</sup>, B. Singhal<sup>80</sup>, A. Siodmok<sup>1,357</sup>, Y. Sirois<sup>9,82,83</sup>, E. Sirtori<sup>151</sup>, B. Sitar<sup>396</sup>, D. Sittardi<sup>1</sup>, E. Sitti<sup>152</sup>, T. Sjöstrand<sup>59</sup>, P. Skands<sup>397</sup>, L. Skinnari<sup>294</sup>, K. Skoufaris<sup>1</sup>, K. Skovpen<sup>329</sup>, M. Skrzypek<sup>108</sup>, P. Slavich<sup>138,139,140</sup>, V. Slokenbergs<sup>23</sup>, V. Smaluk<sup>6</sup>, J. Smiesko<sup>1,398</sup>, S.S. Snyder<sup>6</sup>, E. Solano<sup>173</sup>, P. Sollander<sup>1</sup>, O.V. Solovyanov<sup>1,9,156</sup>, M. Son<sup>399</sup>, F. Sonnemann<sup>1</sup>, R. Soos<sup>1,9,10</sup>, F. Sopkova<sup>191</sup>, T. Sorais<sup>400</sup>, M. Sorbi<sup>44,45</sup>, S. Sorti<sup>44,45</sup>, R. Soualah<sup>401</sup>, M.

Souayah<sup>1</sup>, L. Spallino<sup>48</sup>, S. Spanier<sup>402</sup>, P. Spiller<sup>260</sup>, M. Spira<sup>2</sup>, D. Stagnara<sup>103</sup>, M. Stallmann<sup>188</sup>, D. Standen<sup>1</sup>, J.L. Stanyard<sup>1</sup>, B. Stapfi, G.H. Stark<sup>232</sup>, M. Statera<sup>44</sup>, C. Staudinger<sup>1,206</sup>, G. Streicher<sup>403</sup>, N.P. Strohmaier<sup>2</sup>, R. Stroynowski<sup>107</sup>, S. Stucci<sup>6</sup>, G. Stupakov<sup>7</sup>, S. Su<sup>362</sup>, A. Sublet<sup>1</sup>, K. Sugita<sup>260</sup>, M.K. Sullivan<sup>7</sup>, S. Sultansoy<sup>24</sup>, I. Syratchev<sup>1</sup>, R. Szafron<sup>6</sup>, A. Sznajder<sup>404</sup>, W. Tachon<sup>405</sup>, N.D. Tagdulang<sup>37,173,338</sup>, N.A. Tahir<sup>260</sup>, Y. Takahashi<sup>124</sup>, J. Tamazirt<sup>9,10,11</sup>, S. Tang<sup>6</sup>, Y. Tanimoto<sup>212</sup>, I. Tapan<sup>276</sup>, G.F. Tassielli<sup>12,406</sup>, A.M. Teixeira<sup>9,156,157</sup>, V.I. Telnov<sup>120</sup>, H.H.J. Ten Kate<sup>1,407</sup>, V. Teotia<sup>6</sup>, J. ter Hoeve<sup>300</sup>, A. Thabuis<sup>1</sup>, G.T. Telles<sup>19</sup>, A. Tishelman-Charny<sup>6</sup>, S. Tissandier<sup>109</sup>, S. Tizchang<sup>14,408</sup>, J.-P. Tock<sup>1</sup>, B. Todd<sup>1</sup>, L. Toffolin<sup>1,169,409</sup>, A. Tolosa-Delgado<sup>1</sup>, R. Tomás García<sup>1</sup>, T. Tomasini<sup>410</sup>, G. Tonelli<sup>40,78</sup>, T. Tong<sup>411</sup>, F. Toral<sup>27</sup>, T. Torims<sup>1,364</sup>, L. Torino<sup>173</sup>, K. Torokhtii<sup>29</sup>, R. Torre<sup>141</sup>, E. Torrence<sup>412</sup>, R. Torres<sup>53,186</sup>, Toshiyuki Mitsuhashi<sup>212</sup>, A. Tracogna<sup>151</sup>, O. Traver<sup>173</sup>, D. Treille<sup>1</sup>, A. Tricoli<sup>6</sup>, P. Trubacova<sup>1</sup>, E. Tsemmelis<sup>1</sup>, G. Tsipolitis<sup>270</sup>, V. Tsulaia<sup>142</sup>, B. Tuchming<sup>3</sup>, C.G. Tully<sup>165</sup>, I. Turk Cakir<sup>58</sup>, C. Turrioni<sup>64</sup>, J. Tynan<sup>106</sup>, F.P. Ucci<sup>128,352</sup>, S. Udongwo<sup>413</sup>, C.S. Ün<sup>276</sup>, A. Unnervik<sup>1</sup>, A. Upegui<sup>100,101</sup>, J.P. Uribe-Ramírez<sup>205</sup>, J. Uythoven<sup>1</sup>, R. Vaglio<sup>36,92</sup>, F. Valchkova-Georgieva<sup>414</sup>, P. Valente<sup>172</sup>, R.U. Valente<sup>172</sup>, A.-M. Valente-Feliciano<sup>371</sup>, G. Valentino<sup>1,194</sup>, C.A. Valerio-Lizarraga<sup>205,325</sup>, S. Valette<sup>1</sup>, J.W.F. Valle<sup>320</sup>, L. Valle<sup>1</sup>, N. Valle<sup>128</sup>, N. Vallis<sup>1,2,115</sup>, G. Vallone<sup>142</sup>, P. van Gemmeren<sup>160</sup>, W. Van Goethem<sup>1</sup>, P. van Hees<sup>59</sup>, U. van Rienen<sup>413</sup>, L. van Riesen-Haupt<sup>1,115</sup>, P. Van Trappen<sup>1</sup>, M. Vande Voorde<sup>415,416</sup>, A.L. Vanel<sup>1</sup>, E.W. Varnes<sup>362</sup>, J.-L. Vay<sup>142</sup>, F. Veit<sup>287</sup>, I. Veliscek<sup>6</sup>, R. Veness<sup>1</sup>, A. Ventura<sup>161,233</sup>, M. Verducci<sup>40,78</sup>, C.B. Verhaaren<sup>417</sup>, C. Vernieri<sup>7</sup>, A.P. Verweij<sup>1</sup>, J.-F. Vian<sup>418</sup>, A. Vicini<sup>44,45</sup>, N. Vignaroli<sup>161,233</sup>, S. Vignetti<sup>151</sup>, M.C. Villeneuve<sup>220</sup>, I. Vivarelli<sup>25,26</sup>, E. Voevodina<sup>1,132</sup>, D.M. Vogt<sup>419</sup>, B. Voirin<sup>420</sup>, S. Voiriot<sup>106</sup>, J. Voiron<sup>145</sup>, P. Vojtyla<sup>1</sup>, V. Völkl<sup>1</sup>, L. von Freeden<sup>1</sup>, Z. Vostrel<sup>1,421</sup>, N. Voumard<sup>1</sup>, E. Vryonidou<sup>52</sup>, V. Vysotsky<sup>120</sup>, R. Wallny<sup>152</sup>, L.-T. Wang<sup>422</sup>, Y. Wang<sup>9,10,11</sup>, R. Wanzenberg<sup>4</sup>, B.F.L. Ward<sup>423</sup>, N. Wardle<sup>183</sup>, Z. Wa<sup>5,108</sup>, L. Watrelot<sup>1</sup>, A.T. Watson<sup>424</sup>, M.F. Watson<sup>424</sup>, M.S. Weber<sup>90</sup>, C.P. Welsch<sup>53,186</sup>, M. Wendt<sup>1,6</sup>, J. Wenninger<sup>1</sup>, B. Weyer<sup>1</sup>, G. White<sup>425</sup>, S. White<sup>308</sup>, B. Wicki<sup>1</sup>, M. Wadorski<sup>1</sup>, U.A. Wiedemann<sup>1</sup>, A.R. Wiederhold<sup>52</sup>, A. Wiedl<sup>133</sup>, H.-U. Wienands<sup>160</sup>, A. Wieser<sup>152</sup>, C. Wiesner<sup>1</sup>, H. Wilkens<sup>1</sup>, D. Willi<sup>426</sup>, P.H. Williams<sup>53,427</sup>, S.L. Williams<sup>32</sup>, A. Winter<sup>424</sup>, R.B. Wittwer<sup>74</sup>, D. Wollmann<sup>1</sup>, Y. Wu<sup>115</sup>, Z. Wu<sup>9,16,17</sup>, J. Xiao<sup>9,56,57</sup>, K. Xie<sup>388</sup>, S. Xie<sup>37,335</sup>, M. Yalvac<sup>22</sup>, F. Yaman<sup>427,428</sup>, W.-M. Yao<sup>142</sup>, M. Yeresko<sup>9,156,157</sup>, A. Yilmaz<sup>196</sup>, H.D. Yoo<sup>277</sup>, T. You<sup>210</sup>, F. Yu<sup>253,387</sup>, S.S. Yu<sup>80</sup>, T.-T. Yu<sup>412</sup>, S. Yue<sup>1</sup>, A. Zaborowska<sup>1</sup>, M. Zahnd<sup>106</sup>, C. Zamantzas<sup>1</sup>, G. Zanderighi<sup>66,132</sup>, C. Zannini<sup>1</sup>, R. Zanzottera<sup>44,45</sup>, P. Zaro<sup>103</sup>, R. Zennaro<sup>2</sup>, M. Zerlauth<sup>1</sup>, H. Zhang<sup>204</sup>, J. Zhang<sup>160</sup>, Y. Zhang<sup>204</sup>, Z. Zhang<sup>9,10,204</sup>, Y. Zhao<sup>1</sup>, Y.-M. Zhong<sup>429</sup>, B. Zhou<sup>305</sup>, D. Zhou<sup>212</sup>, J. Zhu<sup>305</sup>, G. Zick<sup>374</sup>, M.A. Zielinski<sup>1</sup>, E. Zimmermann<sup>106</sup>, A. Zingaretti<sup>69,166</sup>, J. Zinn-Justin<sup>3</sup>, A.V. Zlobin<sup>37</sup>, M. Zbov<sup>48</sup>, F. Zomer<sup>9,10,11</sup>, S. Zorzetti<sup>37</sup>, X. Zuo<sup>133</sup>, J. Zurita<sup>320</sup>, V.V. Zutshi<sup>394</sup>, M. Zykova<sup>2</sup>.

- 1 Suisse - CERN, European Organization for Nuclear Research
- 2 Suisse - PSI, Paul Scherrer Institute
- 3 France - CEA/Irfu, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l’Univers
- 4 Allemagne - DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron
- 5 Allemagne - Humboldt-Universität zu Berlin
- 6 États Unis d’Amérique - BNL, Brookhaven National Laboratory
- 7 États Unis d’Amérique - SLAC National Accelerator Laboratory
- 8 Royaume Uni - University of Oxford
- 9 France - CNRS/IN2P3, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
- 10 France - IJCLab, Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie

- 11 France - Université Paris-Saclay et Université Paris-Cité
- 12 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari
- 13 Italie - Università di Bari
- 14 Iran - IPM, Institute for Research in Fundamental Science
- 15 Iran - Malayer University
- 16 France - LAPP, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- 17 France - Université Savoie Mont Blanc
- 18 Serbie - University of Belgrade
- 19 Espagne - ICMAB/CISC, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- 20 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tor Vergata
- 21 Italie - Università Roma Tor Vergata
- 22 Turquie - Yozgat Bozok Üniversitesi
- 23 États Unis d'Amérique - Texas Tech University
- 24 Turquie - TOBB ETU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
- 25 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- 26 Italie - Università di Bologna
- 27 Espagne - CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- 28 Arabie Saoudite - KACST, King Abdulaziz City for Science and Technology
- 29 Italie - Università Roma Tre
- 30 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano-Bicocca
- 31 Italie - Università di Milano-Bicocca
- 32 Royaume Uni - University of Cambridge
- 33 Turquie - İstanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg
- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano

- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi
- 59 Suède - Lund University
- 60 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino
- 61 Émirats arabes unis - New York University Abu Dhabi
- 62 États Unis d'Amérique - Stony Brook University
- 63 Royaume Uni - Springer Nature
- 64 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia
- 65 Italie - Università di Perugia
- 66 Allemagne - Technische Universität München
- 67 Turquie - Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
- 68 Turquie - Doguş, Üniversitesi
- 69 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova
- 70 République Populaire de Chine - Harbin Institute of Technology
- 71 États Unis d'Amérique - University of Wisconsin-Madison
- 72 Royaume Uni - RAL, Rutherford Appleton Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 73 Inde - IMSc, Institute of Mathematical Sciences, Chennai
- 74 Suisse - Universität Zürich
- 75 États Unis d'Amérique - University of New Mexique
- 76 France - CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille
- 77 France - Aix-Marseille Université
- 78 Italie - Università di Pisa

- 79 Hongrie - HUN-REN Wigner Research Centre for Physics
- 80 États Unis d'Amérique - Catholic University of America
- 81 États Unis d'Amérique - Duke University
- 82 France - LLR, Laboratoire Leprince-Ringuet
- 83 France - École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris
- 84 Canada - TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
- 85 Canada - Simon Fraser University
- 86 Italie - FEEM, Fondazione Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) Enrico Mattei
- 87 France - BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 88 Turquie - Isik Üniversitesi
- 89 Turquie - Istanbul Teknik Üniversitesi
- 90 Suisse - UNIBE, University of Bern
- 91 Italie - Università di Roma la Sapienza
- 92 Italie - CNR-SPIN, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 93 France - Expert naturaliste et entomologiste
- 94 États Unis d'Amérique - ORNL, Oak Ridge National Laboratory
- 95 Autriche - HEPHY, Institut für Hochenergiephysik
- 96 Suisse - Geos, Bureau d'ingénieurs conseils en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement
- 97 France - APC, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
- 98 France - Université Paris Cité
- 99 Autriche - TUWIEN, Technische Universität Wien
- 100 Suisse - HEPIA, Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- 101 Suisse - HES-SO University of Applied Sciences and Arts Western Suisse
- 102 Suisse - UNIGE, Université de Genève
- 103 France - SETEC ALS, Société d'ingénierie conseil en infrastructures de transport, génie civil et environnement
- 104 États Unis d'Amérique - East Texas A&M University
- 105 Suisse - Amberg Engineering Ltd
- 106 Suisse - ECOTEC Environnement SA, Bureau d'études et de conseil en environnement
- 107 États Unis d'Amérique - Southern Methodist University
- 108 Pologne - IFJ PAN, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences
- 109 France - Cerema, établissement public pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport
- 110 Royaume Uni - Rendel Ltd, Engineering design consultancy firm

- 111 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre
- 112 Turquie - Istanbul Beykent Üniversitesi
- 113 États Unis d'Amérique - University of Iowa
- 114 Inde - Indian Institute of Technology Kanpur
- 115 Suisse - EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 116 Allemagne - Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- 117 Belgique - VUB, Vrije Universiteit Brussel
- 118 France - LPNHE, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
- 119 Italie - Scuola Superiore Meridionale
- 120 Affiliated with an institute formerly covered by a cooperation agreement with CERN
- 121 Canada - University of Saskatchewan and the Canadian Light Source
- 122 Royaume Uni - University of Bristol
- 123 États Unis d'Amérique - Northwestern University
- 124 États Unis d'Amérique - University of Florida
- 125 Canada - York University
- 126 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari
- 127 Italie - Università di Cagliari
- 128 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia
- 129 Canada - Queen's University
- 130 Portugal - CFTP-IST, Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- 131 Suède - Uppsala University
- 132 Allemagne - MPP, Max-Planck-Institut für Physik Garching
- 133 Allemagne - KIT, Karlsruher Institut für Technologie
- 134 Ukraine - NSC KIPT, National Science Center Kharkiv Institute of Physics and Technology
- 135 Italie - Università degli Studi dell'Insubria
- 136 Allemagne - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 137 Royaume Uni - JAI, John Adams Institute for Accelerator Science, University of Oxford
- 138 France - CNRS/INP, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique
- 139 France - LPTHE, Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
- 140 France - Sorbonne Université
- 141 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
- 142 États Unis d'Amérique - LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory
- 143 Italie - IIT, Istituto Italiano di Tecnologia

- 144 Turquie - Gümüşhane Üniversitesi
- 145 Suisse - WSP Ingénieurs Conseils SA
- 146 Mexique - UADY, Autonomous University of Yucatan
- 147 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara
- 148 Italie - Università di Ferrara
- 149 France - MARCELEON, Cabinet d'ingénierie juridique et foncière
- 150 Allemagne - Springer Nature
- 151 Italie - CSIL (Economic Research Institute)
- 152 Suisse - ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zurich
- 153 Espagne - UAH, Universidad de Alcalá Madrid
- 154 France - CIA, Conseil Ingénierie Acoustique
- 155 France - Evinerude, Bureau d'études environnementales
- 156 France - LPCA, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
- 157 France - Université Clermont Auvergne
- 158 Australie - ANSTO, Australien Synchrotron
- 159 Inde - Brahmananda Keshab Chandra College
- 160 États Unis d'Amérique - ANL, Argonne National Laboratory
- 161 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce
- 162 Italie - Università di Palermo
- 163 Pologne - Wrocław University of Science and Technology
- 164 États Unis d'Amérique - Rutgers University
- 165 États Unis d'Amérique - Princeton University
- 166 Italie - Università di Padova
- 167 Turquie - IUE, İzmir Ekonomi Üniversitesi
- 168 Turquie - Ege Üniversitesi
- 169 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Udine
- 170 Italie - Università di Udine
- 171 États Unis d'Amérique - University of Massachusetts Amherst
- 172 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
- 173 Espagne - CELLS/ALBA, Consortium for the Construction, Equipment and Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory
- 174 France - LPSC, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
- 175 France - Université Grenoble Alpes
- 176 Italie - Università degli Studi di Napoli Parthenope
- 177 États Unis d'Amérique - National High Magnetic Field Laboratory

- 178 États Unis d'Amérique - Florida State University
- 179 Afrique du Sud - University of Johannesburg
- 180 Espagne - IGFAE, Instituto Galego de Física de Altas Enerxías, Universidade de Santiago de Compostela
- 181 Royaume Uni - LSE, London School of Economics
- 182 Espagne - Universidade de Santiago de Compostela
- 183 Royaume Uni - Imperial College London
- 184 États Unis d'Amérique - MIT, Massachusetts Institute of Technology
- 185 France - CETU, Centre d'Etude des Tunnels
- 186 Royaume Uni - University of Liverpool
- 187 Suisse - Linde Kryotechnik AG
- 188 Suisse - ILF Consulting Engineers
- 189 Danemark - NBI, Niels Bohr Institute
- 190 Japon - Hokkaido University
- 191 République Tchèque - CUNI, Charles University
- 192 Espagne - Universidad de Granada
- 193 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
- 194 Malte - University of Malta
- 195 États Unis d'Amérique - BU, Boston University
- 196 Turquie - IBU, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
- 197 Allemagne - Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- 198 Australie - University of Adelaide
- 199 Finlande - HIP, Helsinki Institute of Physics, University of Helsinki
- 200 Belgique - ULB, Université Libre de Bruxelles
- 201 Allemagne - IMA, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
- 202 Belgique - CP3, Centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie, Université Catholique de Louvain
- 203 Pays Bas - NIKHEF, Nationaal instituut voor subatomaire fysica
- 204 République Populaire de Chine - IHEP, Chinese Academy of Sciences
- 205 Mexique - UAS, Universidad Autónoma de Sinaloa
- 206 Autriche - BOKU, Universität für Bodenkultur Wien
- 207 États Unis d'Amérique - Purdue University
- 208 Inde - University of Delhi
- 209 France - Ginger BURGEAP, bureau d'études en environnement
- 210 Royaume Uni - King's College London
- 211 États Unis d'Amérique - University of Maryland
- 212 Japon - KEK, High Energy Accelerator Research Organization

- 213 Suisse - Geoenergy, Reservoir Geology and Basin Analysis Group
- 214 France - SETEC International, Société d'ingénierie en charge des transports et des infrastructures
- 215 Turquie - KÜ, Kırıkkale Üniversitesi
- 216 France - SETEC LERM, Société d'ingénierie conseil en matériaux de construction
- 217 Mexique - BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- 218 États Unis d'Amérique - Stanford University
- 219 États Unis d'Amérique - University of Pittsburgh
- 220 Autriche - MUL, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Geotechnik und unterirdisches Bauen
- 221 Autriche - MUL-ZaB, Underground Research Center, Zentrum am Berg
- 222 Espagne - IFAE, Institut de Física d'Altes Energies
- 223 Suisse - FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Suisse
- 224 Inde - UPES, University of Petroleum and Energy Studies
- 225 France - GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
- 226 France - Université Caen Normandie
- 227 Brésil - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 228 Allemagne - Technische Universität Darmstadt
- 229 Pologne - University of Silesia in Katowice
- 230 Portugal - Universidade de Coimbra
- 231 Brésil - UFPel, Universidade Federal de Pelotas
- 232 États Unis d'Amérique - University of California Santa Cruz
- 233 Italie - Università del Salento
- 234 États Unis d'Amérique - Brown University
- 235 États Unis d'Amérique - University of California Berkeley
- 236 Italie - Università di Torino
- 237 États Unis d'Amérique - Johns Hopkins University
- 238 République Populaire de Chine - Fudan University
- 239 France - LAPTh, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique
- 240 République Populaire de Chine - Dongguan University of Technology
- 241 Turquie - Kahramanmaraş, Sütçü İmam Üniversitesi
- 242 Mexique - UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas
- 243 Mexique - MCTP, Mesoamerican Centre for Theoretical Physics
- 244 Mexique - UAZ, Universidad Autónoma de Zacatecas
- 245 Finlande - University of Jyväskylä

- 246 Allemagne - Technische Universität Dortmund
- 247 Royaume Uni - Overleaf
- 248 États Unis d'Amérique - University of Virginia
- 249 États Unis d'Amérique - Cornell University
- 250 États Unis d'Amérique - FIT, Florida Institute of Technology
- 251 Suisse - Shirokuma GmbH
- 252 Pakistan - National Centre for Physics
- 253 Allemagne - Johannes Gutenberg Universität Mainz
- 254 Pakistan - PAEC, Pakistan Atomic Energy Commission
- 255 Inde - Mathabhangha College
- 256 Inde - Harish-Chandra Research Institute
- 257 Allemagne - MPIK, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
- 258 Suède - European Spallation Source ERIC
- 259 France - Centre de calcul de l'IN2P3
- 260 Allemagne - GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
- 261 République de Corée - IBS, Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
- 262 Pologne - University of Warsaw
- 263 Slovénie - University of Ljubljana
- 264 Slovénie - Jozef Stefan Institute
- 265 France - Microhumus, Bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sols dégradés
- 266 Allemagne - Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg
- 267 Turquie - Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi
- 268 Turquie - Giresun Üniversitesi
- 269 Hongrie - University of Miskolc
- 270 Grèce - NTUA, National Technical University of Athens
- 271 Suisse - Transmutex SA
- 272 Irlande - DIAS, Dublin Institute for Advanced Studies, School of Theoretical Physics
- 273 Pologne - AGH, University of Science and Technology
- 274 Iran - University of Science and Technology of Mazandaran
- 275 Royaume Uni - IPPP, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University
- 276 Turquie - Bursa Uludag Üniversitesi
- 277 République de Corée - YU, Yonsei University
- 278 Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN

- 279 France - CPT, Centre de Physique Théorique
- 280 France - Aix-Marseille Université et Université du Sud Toulon Var
- 281 République de Corée - KIAS, Korea Institute for Advanced Study
- 282 Canada - Carleton University
- 283 Grèce - FEAC Engineering P.C.
- 284 Grèce - UPATRAS, University of Patras
- 285 États Unis d'Amérique - University of Kansas
- 286 Grèce - AUTH, Aristotle University of Thessaloniki
- 287 Allemagne - IML, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
- 288 Allemagne - RWTH Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- 289 Suisse - ZHAW, Zurich University of Applied Sciences
- 290 Allemagne - Universität Münster
- 291 Afrique du Sud - University of the Witwatersrand
- 292 Autriche - Fachhochschule Technikum Wien
- 293 États Unis d'Amérique - University of California Irvine
- 294 États Unis d'Amérique - Northeastern University
- 295 France - ESI, European Scientific Institute
- 296 République de Corée - UOS, University of Seoul
- 297 République de Corée - KNU Kyungpook National University
- 298 République de Corée - KU, Korea University
- 299 Finlande - Tampere University
- 300 Royaume Uni - University of Edinburgh
- 301 Suisse - BG Ingénieurs Conseils
- 302 République Populaire de Chine - T.-D. Lee Institute
- 303 République Populaire de Chine - Shanghai Jiao Tong University
- 304 Italie - CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 305 États Unis d'Amérique - University of Michigan
- 306 États Unis d'Amérique - University of Pennsylvania
- 307 États Unis d'Amérique - University of Minnesota
- 308 France - ESRF, European Synchrotron Radiation Facility
- 309 Royaume Uni - SUSSEX, University of Sussex
- 310 Italie - Università di Bari Aldo Moro
- 311 Royaume Uni - University of Bath
- 312 Italie - Scuola Normale Superiore di Pisa

- 313 Brésil - Universidade de São Paulo
- 314 Autriche - Universität Graz
- 315 Egypte - Center for High Energy Physics, Fayoum University
- 316 Egypte - Center of theoretical physics, British University in Egypte
- 317 Egypte - Cairo University
- 318 France - Sorbonne Université et Université Paris Cité
- 319 Italie - Università di Genova
- 320 Espagne - IFIC-CSIC/UV, Instituto de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universidad de Valencia
- 321 Suisse - Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
- 322 Estonie - NICPB, National Institute for Chemical Physics and Biophysics
- 323 Estonie - UT, University of Tartu
- 324 Espagne - Universidad de Salamanca
- 325 Mexique - UGTO, Universidad de Guanajuato
- 326 Suisse - Edaphos engineering
- 327 Allemagne - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
- 328 Inde - Tata Institute of Fundamental Research Mumbai
- 329 Belgique - Universiteit Gent
- 330 Italie - CNR-IOM, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 331 Autriche - JKU, Johannes Kepler Universität Linz
- 332 Norvège - University of Stavanger
- 333 Colombie - Universidad Nacional de Colombia
- 334 Italie - Trento Institute for Fundamental Physics and Applications
- 335 États Unis d'Amérique - Caltech, California Institute of Technology
- 336 Italie - Università della Calabria
- 337 Espagne - IFT, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid
- 338 Espagne - UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
- 339 Portugal - Departamento de Física, Universidade do Minho
- 340 Portugal - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto
- 341 Portugal - LaPMET, Laboratory of Physics for Materials and Emergent Technologies
- 342 Norvège - University of Bergen
- 343 Chili - SAPHIR, Instituto Milenio de Física Subatómica en la Frontera de Altas Energías
- 344 Chili - Universidad Andres Bello
- 345 Brésil - IIP, International Institute of Physics
- 346 Japon - Tokyo International University

- 347 Turquie - Izmir Bakırçay Üniversitesi
- 348 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
- 349 Italie - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
- 350 Serbie - Vinca Institute of Nuclear Sciences
- 351 États Unis d'Amérique - Kennesaw State University
- 352 Italie - Università di Pavia
- 353 États Unis d'Amérique - Columbia University
- 354 États Unis d'Amérique - DOE, Department of Energy of the États Unis d'Amérique of America
- 355 France - IPSA, Institut Polytechnique des Sciences Avancées
- 356 Italie - Università degli Studi del Sannio
- 357 Pologne - UJ, Université Jagellonne (Cracovie)
- 358 Autriche - Universität Wien
- 359 Allemagne - Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Angewandte Physik
- 360 Allemagne - HFFH, Helmholtz Forschungsakademie Hessen für FAIR
- 361 Roumanie - INCDTIM, National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies
- 362 États Unis d'Amérique - University of Arizona
- 363 Allemagne - Technische Universität Dresden
- 364 Lettonie - RTU, Riga Technical University
- 365 Royaume Uni - Lancaster University
- 366 Chypre - University of Chypre
- 367 Chypre - Cosmos Open University
- 368 Brésil - CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
- 369 Allemagne - Universität Bonn
- 370 Thaïlande - CMU, Chiang Mai University
- 371 États Unis d'Amérique - JLAB, Thomas Jefferson National Accelerator Facility
- 372 Équateur - ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral
- 373 Croatie - IRB, Rudjer Boskovic Institute
- 374 France - Air Liquide Advanced Technologies
- 375 Pays Bas - VU Amsterdam
- 376 France - INGÉROP ,Groupe d'ingénierie et de conseil en mobilité durable, transition énergétique et cadre de vie
- 377 Pologne - Warsaw University of Technology
- 378 Espagne - IFCA, Instituto de Física de Cantabria
- 379 Allemagne - Institut für Beschleunigerphysik und Technologie
- 380 Turquie - Uşak Üniversitesi

381 Japon - ICEPP, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo  
382 Royaume Uni - Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford  
383 Royaume Uni - All Souls College, University of Oxford  
384 Turquie - Akdeniz Üniversitesi  
385 Suisse - Latitude Durable SARL  
386 Espagne - USAL, Universidad de Salamanca  
387 Allemagne - PRISMA+ Cluster of Excellence  
388 États Unis d'Amérique - Michigan State University  
389 Espagne - Universidad Complutense Madrid  
390 Suisse - scMetrology SARL  
391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa  
392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials  
393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali  
394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University  
395 Inde - Banaras Hindu University  
396 Slovaquie - Comenius University  
397 Australie - Monash University  
398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences  
399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
400 France - Amberg Engineering Chambéry  
401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology  
402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee  
403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung  
404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales  
406 Italie - Università LUM, Casamassima  
407 Pays Bas - University of Twente  
408 Iran - Arak University  
409 Italie - Università di Trieste  
410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières  
411 Allemagne - Universität Siegen  
412 États Unis d'Amérique - University of Oregon  
413 Allemagne - Universität Rostock  
414 Suisse - CEGELEC SA  
415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm

- 416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics
- 417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University
- 418 France - Expert foncier et agricole
- 419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart
- 420 France - École Normale Supérieure de Lyon
- 421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University
- 422 États Unis d'Amérique - University of Chicago
- 423 États Unis d'Amérique - Baylor University
- 424 Royaume Uni - University of Birmingham
- 425 Royaume Uni - University of Southampton
- 426 Suisse - Swisstopo, Federal Office of Topography
- 427 Royaume Uni - Daresbury Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 428 Turquie - IZTECH, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- 429 Hong Kong - City University of Hong Kong
- + décédé(e)

## Résumé

Le Volume 3 du rapport de faisabilité du FCC présente des études relatives au génie civil, à l'élaboration d'un scénario d'implantation du projet, ainsi qu'aux aspects environnementaux et de durabilité. Le rapport détaille les améliorations itératives apportées aux concepts de génie civil depuis 2018, en tenant compte des conditions du sous-sol, des exigences en matière d'accélérateurs et d'expériences, ainsi que de considérations de nature territoriale. Il décrit une configuration de génie civil techniquement réalisable et économiquement viable qui sert de base aux études de sous-sol détaillées, à la conception de la construction, à l'estimation des coûts et à la planification de la mise en œuvre du projet. En outre, le rapport met en évidence les études de sous-sol en cours dans des zones clés afin de soutenir le développement d'un modèle souterrain 3D amélioré pour la région.

Le rapport décrit le développement du scénario de projet basé sur l'approche d'optimisation itérative « Éviter-Réduire-Compenser ». Le scénario de référence établit un équilibre entre les performances physiques optimales et la compatibilité territoriale, les risques de mise en œuvre et les coûts. Des études environnementales sur le terrain couvrant près de 600 hectares et portant sur de nombreux aspects urbains, économiques, sociaux et techniques ont confirmé la faisabilité technique du projet et ont contribué à la préparation des documents d'entrée essentiels pour la phase d'autorisation officielle du projet. Le résumé souligne également l'ouverture d'un dialogue public dans le cadre de la procédure d'autorisation. Les résultats d'une évaluation complète de l'impact socio-économique, qui comprend aussi les effets environnementaux significatifs, sont présentés. Même dans les conditions les plus prudentes et les plus strictes, on obtient un ratio coûts-bénéfices positif pour la phase FCC-ee. Enfin, le rapport donne un bref résumé des études menées pour documenter l'état actuel de l'environnement.

## Préface de la Directrice générale du CERN

En 2021, en réponse à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire (FCC).

Le présent rapport résume l'immense travail effectué par la collaboration internationale pour le FCC pendant plusieurs années. Il couvre, entre autres, les objectifs et le potentiel de la physique, la géologie, le génie civil, l'infrastructure technique, l'implantation territoriale, les aspects environnementaux, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les bénéfices socio-économiques et le coût. Il constitue une contribution importante à la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'étude de faisabilité a nécessité la participation active d'un large éventail de parties prenantes. En particulier, tout au long de l'étude, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse et a travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Je suis très reconnaissante aux autorités et aux équipes des États hôtes pour leur aide précieuse. En outre, des parties importantes de l'étude ont été soutenues par l'Union européenne dans le cadre des programmes-cadres Horizon 2020 et Horizon Europe. L'étude a également bénéficié des contributions de laboratoires d'accélérateurs et d'universités de toute l'Europe, comme l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), ainsi que des Amériques, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Australie.

Le programme FCC intégré proposé comprend deux étapes possibles : un collisionneur électron-positron servant à la production de bosons de Higgs, d'interactions électrofaibles et de quarks top fonctionnant à différents niveaux d'énergie au centre de masse, suivi ultérieurement par un collisionneur proton-proton fonctionnant à un niveau d'énergie de collision sans précédent d'environ 100 TeV. Les programmes de physique complémentaires de chaque étape correspondent aux priorités dans le domaine de la physique, telles qu'elles sont exprimées dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'une des principales réalisations de l'étude de faisabilité est le choix de l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'ensemble de l'infrastructure, y compris les sites de surface et les puits d'accès, qui a été développé et optimisé pendant plusieurs années selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Des études de durabilité ont évalué l'efficacité énergétique, l'utilisation des sols, la gestion de l'eau et des ressources, ainsi que l'impact socio-économique, garantissant que le FCC soit conçu conformément aux normes environnementales et sociétales les plus actuelles.

Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce rapport pour leur travail acharné et leur engagement, qui ont permis d'obtenir les résultats exceptionnels présentés ici.

Fabiola Gianotti CERN,  
Directrice générale

## Préface du Président du conseil de collaboration FCC

S'appuyant sur la précédente étude de conception du futur collisionneur circulaire (FCC) menée entre 2014 et 2018, l'étude de faisabilité du FCC (2021-2025) a été réalisée grâce à une solide collaboration internationale, qui comprend désormais plus de 160 instituts dans le monde entier. Le « programme intégré » du FCC, développé dans le cadre de l'étude de faisabilité, consiste en un premier collisionneur électrons-positrons, le FCC-ee, qui pourra être suivi d'un collisionneur protons-protons, le FCC-hh. Cet échelonnement dans le temps tient compte des priorités dans le domaine de la physique, telles que formulées dans les mises à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules de 2012 et 2020, ainsi que de l'état de préparation technologique et des coûts relatifs des FCC-ee et FCC-hh.

Au fil des ans, j'ai suivi de près l'avancement régulier de l'étude, en représentant la collaboration FCC au sein du Comité directeur international et en participant aux réunions annuelles de la Semaine FCC, qui comprennent les sessions du Comité de collaboration internationale. L'engagement et l'enthousiasme des membres de la collaboration ont toujours été impressionnants. L'effort collectif est clairement visible. La participation des étudiants et des chercheurs en début de carrière est en augmentation. Il existe vraiment une détermination commune et un élan pour aller de l'avant.

La forte collaboration internationale autour du FCC et son réseau mondial constituent une base solide pour l'avenir de ce projet. La communauté FCC ne cesse de s'agrandir, avec l'engagement croissant de nouveaux instituts et partenaires dans le monde entier. Ce large soutien sera essentiel lorsque le projet entrera dans sa prochaine phase.

L'étude de faisabilité du FCC démontre non seulement la viabilité technique du projet, mais aussi la force de la communauté internationale qui le soutient. Alors que nous passons à l'étape suivante de la phase de prise de décision, cet effort collectif est essentiel pour montrer la voie à suivre. Le FCC promet des opportunités scientifiques de grande envergure et des avantages à long terme pour l'innovation, la formation et la collaboration mondiale dans le domaine de la science et de la technologie.

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

## Table des matières

<b>4. Développement durable .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Contexte.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. Introduction.....</b>	<b>28</b>
4.2.1. Infrastructures de recherche durables .....	28
4.2.2. Approche .....	30
4.2.3. Le contexte européen .....	32
4.2.4. Le contexte en France.....	34
4.2.5. Le contexte en Suisse .....	36
<b>4.3. Méthodologie.....</b>	<b>37</b>
<b>4.4. Facilitateurs de durabilité socio-économique .....</b>	<b>38</b>
4.4.1. Voies d'impact .....	38
4.4.2. Innovation et R&D.....	44
<b>4.5. Évaluation complète des performances de durabilité sur la base d'une analyse des coûts et des bénéfices.....</b>	<b>45</b>
<b>4.6. Limites .....</b>	<b>47</b>
<b>4.7. Analyse du cycle de vie.....</b>	<b>50</b>
4.7.1. Contexte.....	50
4.7.2. Méthodologie .....	51
4.7.3. Résultats .....	53
<b>4.8. Performances socio-économiques .....</b>	<b>56</b>
4.8.1. Contexte.....	56
4.8.2. Résultats .....	58
4.8.3. Couverture des coûts et des bénéfices.....	61
4.8.4. Coût et facteurs externes négatifs .....	62
4.8.5. Voies d'impact .....	64
4.8.6. Bénéfices élargis .....	71
4.8.7. Conclusions.....	79
<b>4.9. Retours sur investissement pour les pays participants .....</b>	<b>81</b>
4.9.1. Vue d'ensemble .....	81
4.9.2. Opportunités d'emploi au niveau local .....	83
4.9.3. Opportunités de création d'impacts .....	83
<b>4.10. Exigences et contraintes pour une phase préparatoire .....</b>	<b>85</b>
<b>4.11. Recommandations pour un projet de phase préparatoire .....</b>	<b>86</b>
<b>5. Références.....</b>	<b>89</b>

## 4. Développement durable

### 4.1. Contexte

L'engagement de longue date du CERN en faveur du développement durable, intégrant des objectifs scientifiques, environnementaux et sociétaux, est un principe directeur dans la définition d'une future infrastructure de collisionneur de particules. Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'intégration, dans le processus d'élaboration des scénarios, de stratégies conformes aux principes directeurs et aux politiques de l'Organisation, pour que la conception du FCC soit un modèle de développement responsable d'infrastructures scientifiques d'envergure.

Dès le départ, les études et les développements pour le FCC ont intégré les principes directeurs existants du CERN en matière de protection de l'environnement, avec des préoccupations qui vont au-delà de la biosphère et couvrent plusieurs aspects des trois dimensions de la durabilité. Il s'agit, par exemple, d'optimiser l'utilisation des ressources, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de donner la priorité à l'excavation durable et à la réutilisation des matériaux. L'étude de faisabilité a également pris en compte les efforts déployés par le CERN en matière de gestion de la biodiversité et d'utilisation des sols, pour que les activités de construction et d'exploitation respectent les écosystèmes locaux. Elle s'appuie sur les résultats et l'expérience des initiatives passées et présentes du CERN en matière d'efficacité énergétique et de récupération de la chaleur fatale, dans le but de réduire la consommation globale d'énergie, d'utiliser l'énergie de manière responsable et d'apporter une contribution à l'alimentation des réseaux énergétiques régionaux. La conservation de l'eau, la gestion du bruit et la réduction des émissions sont d'autres éléments clés de l'étude, qui renforcent l'objectif du CERN de concilier progrès scientifique de pointe et gestion responsable de l'environnement.

La réalisation de ces objectifs nécessite une coopération étroite avec les autorités des deux États hôtes, ainsi qu'un engagement significatif vis-à-vis du public. L'étude de faisabilité jette les bases du dialogue avec les organismes de réglementation nationaux et régionaux, en veillant à ce que le projet FCC soit conforme à la législation environnementale et aux objectifs de développement durable tant en France qu'en Suisse. En outre, des discussions ouvertes et continues avec les communautés locales seront essentielles pour répondre aux préoccupations, partager les meilleures pratiques et élaborer une approche collaborative afin de parvenir à un cadre environnemental, social et de gouvernance (ESG) capable de garantir la durabilité à long terme de cette nouvelle infrastructure de recherche.

En intégrant les leçons tirées des projets passés et actuels du CERN et en tirant parti des innovations adoptées par d'autres projets d'infrastructure d'envergure dans le domaine scientifique et au-delà, l'étude de faisabilité du FCC vise à établir de nouvelles références en matière de durabilité dans les projets scientifiques d'envergure. Cette étude s'appuie sur les principes énoncés dans les lois et réglementations internationales et nationales, les meilleures pratiques et les politiques et stratégies publiées par le CERN, en intégrant les meilleures pratiques visant à éviter, à réduire et à atténuer les impacts, ainsi que les principes de l'économie circulaire et l'implication des parties prenantes. Ainsi, ce chapitre jette les bases d'un projet potentiel d'implantation du FCC qui non seulement fait progresser la création de connaissances par le biais de la recherche physique fondamentale, mais le fait en s'engageant fermement en faveur d'une durabilité à long terme qui englobe l'excellence scientifique, l'environnement et la société.

## 4.2. Introduction

### 4.2.1. Infrastructures de recherche durables

Les infrastructures de recherche (IR) sont des installations qui fournissent des ressources et des services aux organisations de recherche afin qu'elles puissent mener des recherches et favoriser l'innovation [93]. Une IR peut être une installation unique, comme, par exemple l'European Spallation Source (ESS) ou le XFEL européen, ou encore une installation faisant partie d'une organisation qui héberge plusieurs installations, comme le Grand collisionneur de hadrons (LHC) et d'autres accélérateurs de particules au CERN (par exemple, le Décélérateur d'antiprotons, ELENA, PS, SPS) qui offrent des possibilités de recherche scientifique dédiées. Le futur collisionneur circulaire (FCC) sera une infrastructure de recherche hébergée par le CERN, conçue et construite grâce à une collaboration internationale, offrant un accès libre à une communauté mondiale de scientifiques.

Le développement durable, ou « durabilité », fait référence à la capacité de maintenir une activité à un certain rythme ou à un certain niveau. Il intègre trois enjeux : la société, l'économie et l'environnement (Fig. 4.1). Un programme ou un projet scientifique peut être considéré comme durable s'il est en mesure de mener à bien sa mission scientifique de base en respectant trois critères d'exigence : obtenir une « licence sociale » pour opérer [94], maintenir un équilibre écologique en appliquant une séquence « éviter-réduire-compenser » [95] et être abordable à long terme avec des risques bien compris et bien gérés.



Fig. 4.1 : Les dimensions de la durabilité.

Un processus d'évaluation permet de comprendre si un programme ou un projet est durable et se donne les moyens d'identifier les voies à suivre pour améliorer sa durabilité. Ce processus associe aspects financiers et aspects socio-économiques. Ces derniers comprennent les bénéfices sociaux et environnementaux, ainsi que les effets négatifs, y compris les coûts au plan environnemental. La norme ISO pour l'évaluation monétaire des impacts environnementaux (ISO 14008 [96]) et les lignes directrices pour la détermination des coûts et des bénéfices environnementaux (ISO 14007 [97]) démontrent l'importance de l'application de ces coûts unitaires environnementaux dans les rapports sur l'environnement et le développement durable au niveau de l'organisation et du projet. Les projets scientifiques peuvent atteindre une valeur actuelle nette socio-économique positive. Si leur performance financière est trop faible, le modèle de financement doit être revu. Les projets qui sont financièrement viables, mais qui n'ont pas ou peu de bénéfices socio-économiques, doivent être révisés. Les projets qui sont financièrement et socio-économiquement positifs peuvent être durables (Fig. 4.2).

Une analyse socio-économique complémentaire qui intègre toutes les dimensions du développement durable aide à comparer les variantes et les versions des scénarios de projet et permet de planifier la durabilité à long terme. Une infrastructure de recherche doit périodiquement contrôler et suivre les performances sociales, environnementales et économiques par rapport aux estimations initiales afin de mettre en œuvre un processus d'amélioration continue.

Conformément à la directive européenne 2009/125/CE sur l'écoconception [17], le développement durable exige une prise en compte adéquate des trois éléments de durabilité, y compris l'identification et la comptabilisation des impacts positifs et négatifs tout au long du cycle de vie d'un programme ou d'un projet. Pour les IR effectuant des missions scientifiques, les enjeux suivants doivent au moins être pris en compte :

– Économie :

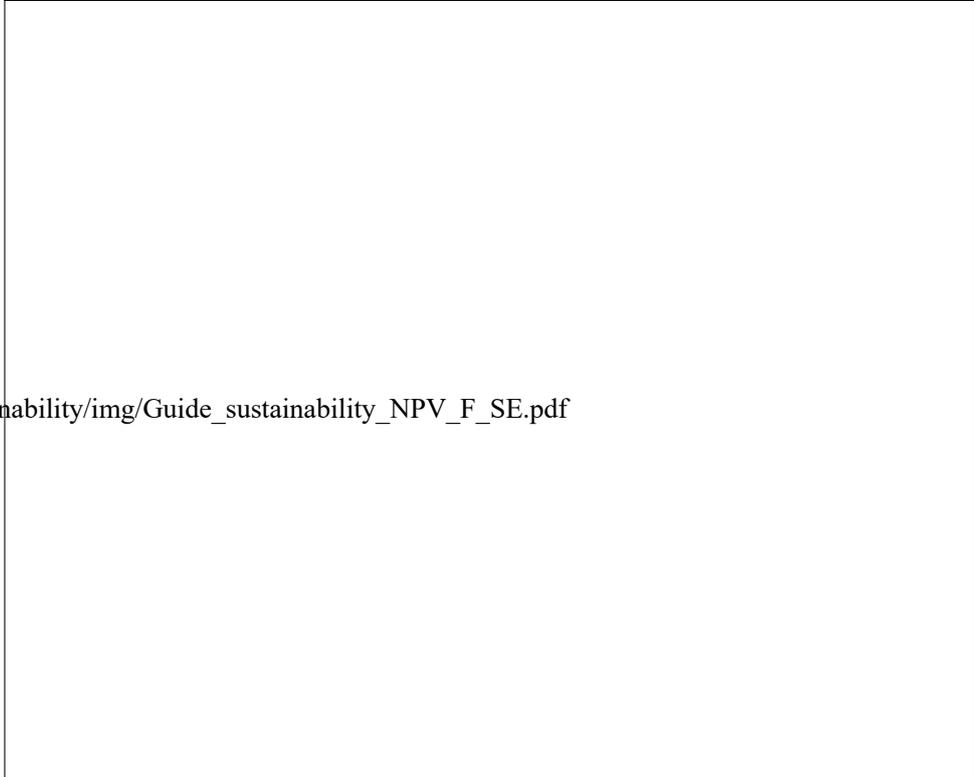
- Excellence scientifique ;
- Coûts totaux (dépenses d'investissement et d'exploitation) ;
- Risques et risques résiduels après atténuation ;
- Valeur ajoutée et emplois directs, indirects et induits ;
- Bénéfices économiques potentiels supplémentaires quantifiés ;

– Société :

- Potentiel quantifié des bénéfices sociaux supplémentaires ;
- Valeur du bien commun (la valeur de la mission scientifique telle qu'elle est perçue par les gens)
- Compatibilité territoriale ;
- Licence sociale ;

– Environnement :

- Facteurs externes négatifs quantifiés ;
- Potentiel quantifié des bénéfices environnementaux supplémentaires.



Sustainability/img/Guide\_sustainability\_NPV\_F\_SE.pdf

Fig. 4.2 : Orientations pour la durabilité des projets d'investissement public. Voir Réf. [98].

#### 4.2.2. Approche

Un nouveau collisionneur de particules et son infrastructure technique représentent d'importants investissements à long terme pour les pays participants et les partenaires financiers. Un processus d'évaluation est nécessaire pour comprendre les facteurs de coûts et les bénéfices qu'il est possible de tirer. La réduction des premiers, le développement des seconds et la conception d'un modèle de financement à long terme reposant sur une collaboration internationale sont nécessaires pour assurer la durabilité à long terme dès la phase conceptuelle. Les agences de financement, les organismes de stratégie scientifique (par exemple, l'ESFRI), les organismes notifiés nationaux chargés de délivrer les autorisations, ainsi que les banques d'investissement susceptibles d'accorder des prêts à long terme pour des projets financés par des fonds publics (par exemple, la BEI) exigent des preuves de la viabilité du projet. Le processus structuré d'évaluation de la possibilité de poursuivre un projet de préparation à la mise en œuvre et de validation de la viabilité du projet est appelé « évaluation de projet ».

Ce chapitre rassemble également un ensemble de cadres réglementaires et de lignes directrices d'évaluation existant au niveau européen, en France et en Suisse, afin de fournir un aperçu des exigences de durabilité qui régissent la planification et la mise en œuvre de nouveaux projets d'infrastructure de recherche au CERN ayant une importance stratégique et des besoins en matière de développement territorial. Dans les pays qui font partie de l'espace européen de la recherche (EER), des cadres juridiques régissent le respect des aspects liés au développement durable. D'autres pays, tels que l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis, appliquent encore largement la prise de décision en matière de projets sur la base de panels, bien que le Royaume-Uni procède à des évaluations a posteriori au cas par cas et que l'Australie évalue de façon périodique la durabilité des infrastructures de recherche. Les critères de durabilité et d'environnement, tels que les considérations climatiques, sont de plus en plus souvent intégrés dans la conception et l'évaluation des propositions. La Suisse a récemment précisé les aspects de durabilité pour les projets d'importance stratégique du CERN comportant un développement territorial, avec la mise à jour de la loi [99,100] en faveur de l'encouragement de la recherche et de l'innovation qui introduit un processus d'autorisation au niveau fédéral. L'« Ordonnance concernant l'approbation des plans des constructions et installations du CERN (OCIC) » [101], qui fixe les modalités de mise en œuvre de ce plan pour la procédure d'autorisation, a été publiée pour examen par le public en février 2025. Outre les thèmes environnementaux courants (par exemple, l'air, l'eau et le sol), il est nécessaire d'évaluer les incidences sur le climat et de prendre des mesures spécifiques pour se conformer aux lois sur la protection du climat.

La prise en compte des facteurs externes environnementaux quantitatifs<sup>1</sup>, tant positifs que négatifs, est encore une approche émergente dans le domaine des infrastructures de recherche, à moins qu'elle ne soit explicitement requise par les législations nationales et régie par des lignes directrices nationales. Une telle analyse socio-économique plus large est, cependant, déjà une pratique courante d'évaluation générale des projets d'infrastructure dans de nombreux pays européens dont la France [102], l'Allemagne [103,104], l'Italie et la Suisse, ainsi qu'au niveau de l'UE à travers les conditions de financement de la CE pour de nombreux secteurs, par exemple Connecting Europe [105], le transport [106], l'énergie [107], les projets d'investissement régionaux [108], ainsi que la préservation et la restauration de la nature [109].

Des méthodes d'évaluation des investissements publics et de garantie qu'un projet contribue à l'amélioration du bien-être public<sup>2</sup> existent dans différents secteurs politiques et institutionnels [110, 111], y compris pour ce qui concerne les impacts environnementaux [112]. Elles sont déjà utilisées pour des projets d'infrastructure de recherche, notamment des accélérateurs de particules comme la source lumineuse ALBA [113], la source lumineuse SOLEIL [114], le synchrotron DESY/PETRA III [115], l'installation de thérapie hadronique CNAO [116], le LHC [117], le LHC à haute luminosité (HL-LHC) [118–120] et l'étude sur le collisionneur linéaire compact (CLIC) [121]. L'étude du futur collisionneur circulaire (FCC) [122] a, notamment, consacré des ressources importantes à ce sujet sur une période de près de dix ans et a contribué à l'avancement du processus d'évaluation des infrastructures de recherche à l'échelle internationale grâce à des contributions scientifiques dans ce domaine et à la participation à des projets collaboratifs d'évaluation de l'impact au niveau de l'UE. L'approche est également utilisée pour d'autres installations scientifiques telles que le télescope Einstein [123], l'installation d'approvisionnement en chaleur de Paris Saclay [124], l'hôpital universitaire de Nantes [125] et par l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO) [126] pour évaluer un certain nombre de programmes scientifiques différents. De plus en plus d'IR, comme le Square Kilometre Array, envisagent cette approche dans l'optique d'une

planification durable [127]. Les facteurs environnementaux sont de plus en plus souvent intégrés dans ces évaluations [98, 128–130]. Une évaluation complète de l'impact socio-économique est nécessaire lorsqu'une nouvelle proposition de projet d'infrastructure de recherche demande à être inscrite sur la feuille de route du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [131] comme l'indique le guide de la feuille de route 2026 (voir page 25 de la Réf. [132]).

<sup>1</sup> Un facteur externe environnemental est un coût ou un bénéfice qui affecte un tiers qui n'a pas choisi de subir ce coût ou de recevoir ce bénéfice, en particulier en ce qui concerne l'environnement.

<sup>2</sup> Le bien-être public désigne le bien-être collectif de la société qui est assuré par les services et les institutions publiques, dans le but de garantir l'équité, la cohésion sociale et l'accès pour tous aux biens et services essentiels. Résumé paraphrasé de Florio, M. (2019). « Public Enterprises: Resurgence and the Future of the Public Sector ». Springer.

### 4.2.3. Le contexte européen

La durabilité à long terme des infrastructures de recherche au niveau de l'espace européen de la recherche (EER [133]) est principalement guidée par le Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [134,135] 3

Le règlement UE 2021/695 [136] définissant le programme-cadre pour la recherche et l'innovation « Horizon Europe » inclut explicitement des exigences pour relever les défis mondiaux, y compris le changement climatique et les objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies.

Les États membres de l'UE traduisent et intègrent généralement les stratégies, les politiques et les lignes directrices dans leurs feuilles de route et leurs plans nationaux, en plus de leurs politiques nationales existantes.

Une solide vision à long terme est une condition préalable à l'exploitation réussie et durable d'une infrastructure de recherche. L'ESFRI a donc défini un certain nombre de recommandations et d'actions [137].

L'excellence scientifique est la condition sine qua non. Toutefois, un financement suffisant et des modèles de financement durables, nécessaires tout au long du cycle de vie, sont indispensables à une stratégie réussie pour une nouvelle infrastructure de recherche. Associé à des ressources humaines adéquates, ce financement est essentiel pour la phase opérationnelle. Une gouvernance efficace est un autre élément clé pour assurer la durabilité à long terme. En outre, les IR doivent contribuer à leur durabilité en contribuant à leur neutralité carbone afin de soutenir les objectifs de neutralité carbone au niveau national. Il convient de mentionner que la comptabilisation de la neutralité carbone intervient au niveau national.

Si les recommandations actuelles mettent explicitement l'accent sur l'excellence scientifique, la viabilité financière et l'acceptation par la société, l'appel à une évaluation globale de la viabilité et de l'impact englobe implicitement tous les aspects environnementaux. Les recommandations précisent également que les IR doivent consacrer des ressources suffisantes à l'évaluation périodique et à la communication de leurs performances socio-économiques aux divers publics. Les activités pionnières du CERN dans ce domaine sont explicitement mentionnées dans le guide de l'ESFRI [138], qui encourage les autorités nationales à soutenir l'approche en coopération avec des experts du domaine.

La note d'orientation de l'ESFRI [139] détaille la nécessité d'adapter l'évaluation d'impact au projet spécifique et demande d'inclure dans la feuille de route du projet des propositions visant une mise en œuvre sur une période de dix ans et de fournir une évaluation d'impact socio-économique élargie. Conformément à la définition de l'OCDE [140], « la mesure dans laquelle l'intervention a engendré ou devrait engendrer des effets à haut niveau, positifs ou négatifs, voulus ou non ». La Commission européenne [141] précise que « le terme "impact" décrit tous les changements qui devraient se produire en raison de la mise en œuvre et de l'application d'une option/intervention politique donnée [telle qu'un investissement dans une infrastructure de recherche et ses activités]. Ces impacts peuvent se produire à différentes échelles de temps, affecter différents acteurs et être pertinents à différentes échelles (locale, régionale, nationale et européenne) ». Une évaluation a posteriori est nécessaire pour déterminer si les objectifs visés et les estimations a priori ont été effectivement atteints.

Le règlement (UE) n° 2021/1060 du Parlement européen et du Conseil du 24 juin 2021 porte dispositions communes relatives au Fonds européen de développement régional, au Fonds social européen Plus, au Fonds de cohésion, au Fonds de transition Juste et au Fonds européen pour les affaires maritimes, la pêche et l'aquaculture, ainsi qu'aux règles financières applicables à ces fonds et au Fonds Asile, migration et intégration, au Fonds pour la sécurité intérieure et à l'instrument de soutien financier à la gestion des frontières et à la politique des visas. Conformément à l'article 100 du règlement (UE) n° 1303/2013 [142], un grand projet est une opération d'investissement comprenant « un ensemble de travaux, d'activités ou de services destiné à remplir par lui-même une fonction indivisible à caractère économique ou technique précis, qui vise des objectifs clairement définis et dont le coût total éligible dépasse 50 000 000 EUR [...] ». Une évaluation de l'impact socio-économique de ces grands projets est recommandée. Le guide d'évaluation économique de la Commission européenne (European Commission Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 [143]) reprend les principes généraux et fournit des exemples d'application sectorielle pour l'évaluation d'impact, y compris la recherche et l'innovation en Annexe I. Il étend et complète le règlement portant dispositions communes qui recommande l'analyse coûts-bénéfices conformément au règlement (UE) n° 207/2015 [144].

La méthodologie est expliquée en détail dans le Guide méthodologique de la Commission européenne pour la réalisation de l'Analyse Coûts-Avantages des projets d'investissement (European Commission Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects [108]).

L'adaptation au changement climatique, l'atténuation de ses effets et la résilience aux catastrophes sont couvertes par ce Règlement. Par exemple, le facteur externe 4 lié au volume des gaz à effet de serre (GES) et le coût externe du carbone sont explicitement inclus et l'alignement sur les objectifs de décarbonisation de l'UE à l'horizon 2050 est exigé. En ce qui concerne l'adaptation au climat, les coûts des mesures visant à renforcer la résilience du projet par rapport aux effets du changement climatique et qui sont dûment justifiés dans les études de faisabilité doivent être inclus dans l'analyse économique. Les bénéfices de ces mesures, par exemple les mesures prises pour limiter les émissions de GES ou renforcer la résilience, par rapport au changement climatique, aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux autres catastrophes naturelles, devront également être évalués et inclus dans l'analyse économique et si possible quantifiés, sinon ils devront être décrits de manière appropriée.

Une analyse du développement durable (protection de l'environnement, utilisation efficace des ressources, atténuation et adaptation au changement climatique, biodiversité et prévention des risques) devra être effectuée. La présence d'une analyse des options tenant compte des critères techniques, opérationnels, économiques, environnementaux et sociaux pour l'emplacement de l'infrastructure est exigée dans une étude de faisabilité. Cela concerne également la description de la cohérence du projet avec la politique environnementale applicable. Il y aura également lieu de traiter l'efficacité de l'utilisation des ressources, la préservation de la biodiversité et des écosystèmes, la réduction des émissions de GES et la résilience, par rapport aux effets du changement climatique. Le processus doit être conforme à la Directive 2011/92/UE qui définit le processus d'évaluation des incidences sur l'environnement (EIE) et garantit que les projets susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement feront l'objet d'une évaluation avant d'être agréés. Par conséquent, le coût total des incidences négatives sur l'environnement et de leur compensation doivent être réintégrés. Les bénéfices pour l'environnement peuvent également être évalués et ajoutés. Il s'agit, par exemple de contributions visant à améliorer l'approvisionnement en eau et l'assainissement, la gestion des déchets, la capacité et la stabilité énergétiques, les transports, les ports (aéroports, ports maritimes, intermodalité), la recherche et l'innovation et la communication à large bande.

Le processus d'évaluation vise à déterminer si un projet contribuera au bien-être social global et à la croissance économique, en tenant compte des bénéfices et des coûts pour la société. Les manuels de la CE [108] et de l'ONUDI [145] se concentrent sur les aspects économiques et sociétaux, bien que des aspects tels que l'évaluation des facteurs environnementaux externes fassent généralement partie de l'évaluation du projet, comme l'exige la réglementation de l'UE. Par exemple, le coût fictif du carbone et les émissions de GES sont indiqués dans les exemples d'évaluation de projets. Enfin, les exigences en matière d'évaluation sont définies spécifiquement pour chaque projet par l'organisme notifié pour ce projet. Par exemple, pour obtenir des fonds de la Banque européenne d'investissement (BEI), une étude d'évaluation complète incluant les facteurs externes environnementaux positifs et négatifs est exigée. La BEI a publié un guide [146] consacré à ce sujet, qui comprend des références pour le coût fictif du carbone, ainsi que des exemples de calcul complets et des lignes directrices pour la prise en compte des facteurs externes environnementaux.

D'autres exigences découlent, par exemple d'une demande de financement au titre de la Connecting Europe Facility (CEF). Le règlement InvestEU introduit la durabilité climatique, environnementale et sociale comme éléments du processus de prise de décision lors d'une demande de financement au titre du Fonds InvestEU. Le processus est également une exigence dans le cadre de la phase préparatoire des projets ESFRI. La Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD) exige une évaluation des projets dont les émissions de gaz à effet de serre (GES) potentiellement pertinentes sont supérieures à 25 000 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an, par rapport à un niveau de référence de 100 000 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an. Les exigences nationales diffèrent considérablement les unes des autres, exigeant des évaluations pour les projets d'investissements bénéficiant d'un financement public pouvant descendre à 300 000 euros, comme c'est le cas en Lituanie, par exemple.

<sup>4</sup>Un facteur externe est un coût ou un bénéfice engendré par une partie, mais supporté ou reçu financièrement par une autre. Les facteurs externes peuvent être négatifs ou positifs. Un facteur externe négatif est l'imposition indirecte d'un coût par une partie à une autre. Un facteur externe positif, en revanche, se produit lorsqu'une partie reçoit un bénéfice indirect à la suite d'actions entreprises par une autre partie.

#### 4.2.4. Le contexte en France

En France, le « Code de l'environnement » [147] guide l'approche visant à développer un scénario de projet durable dans le cadre d'un « processus d'évaluation environnementale » qui fait partie de l'autorisation du projet. Le terme « environnement » doit être compris dans son sens premier et dans un sens large : l'environnement et les conditions dans lesquels le projet sera implanté.

L'objectif du processus est de développer un scénario de projet réalisable et durable en suivant la méthode « éviter-réduire-compenser » (ERC), qui est ancrée dans la réglementation européenne et transposée dans le droit français [148]. Par conséquent, le scénario du projet à autoriser vise une valeur nette positive (voir Fig. 4.3).

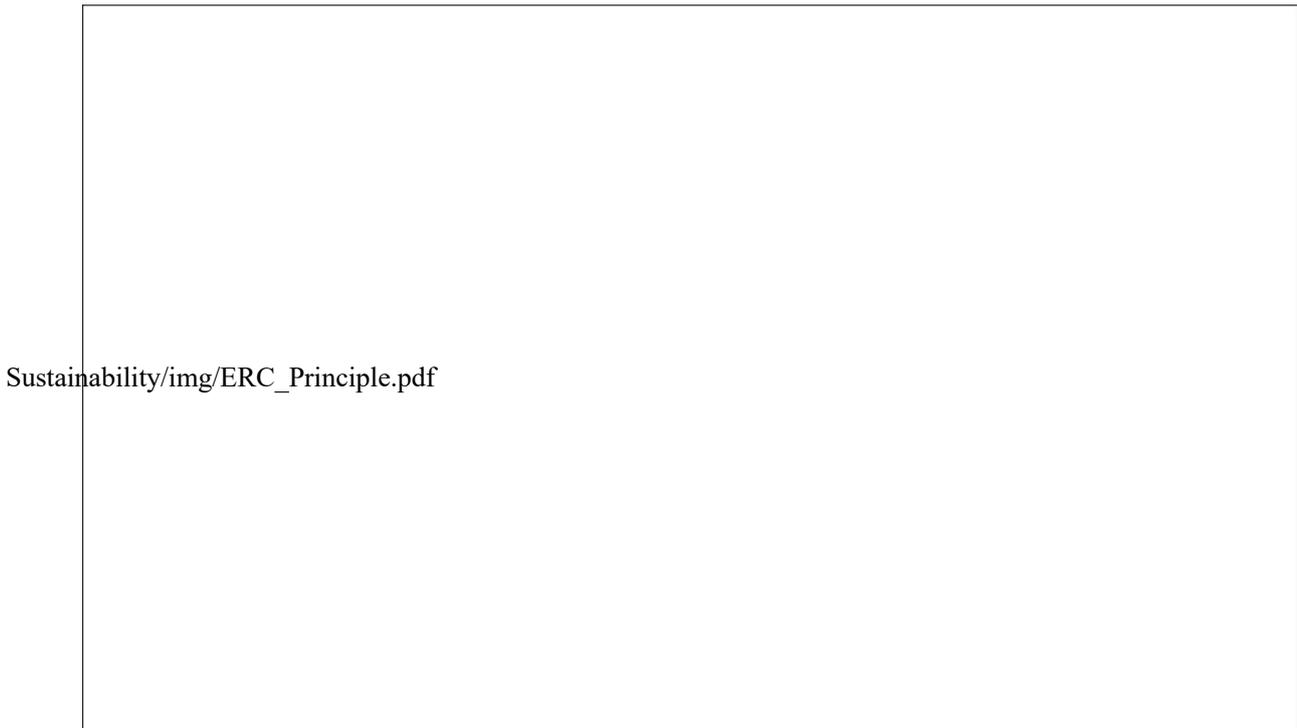


Fig. 4.3 : Approche « Éviter-Réduire-Compenser » pour le développement itératif d'un scénario de projet durable dans le but d'atteindre un équilibre écologique et, dans la mesure du possible, un gain net [13].

Cette approche de développement itératif de variantes et de versions continuellement améliorées est également documentée par la norme internationale ISO 14001 relative au management environnemental. Elle décrit le modèle Planifier-Développer-Contrôler-Ajuster (PDCA) comme un processus itératif permettant d'assurer une amélioration continue (ISO 14001, Pas à pas, Chapitre 1).

Étant donné qu'en France l'évaluation des programmes et des projets est obligatoire pour les investissements publics qui dépassent 20 millions d'euros et qu'une deuxième évaluation est exigée pour les investissements qui dépassent 100 millions d'euros, l'Assemblée nationale suit ces projets chaque année, et en rend compte, en utilisant une approche de fiche d'information standard qui mentionne la valeur actuelle nette comme indicateur global de durabilité, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être évitées. Ces informations sont publiées en annexe de la loi de finances annuelle [149]. En 2023, 13 investissements dans la recherche ont fait l'objet d'évaluations socio-économiques complètes.

L'évaluation porte sur l'ensemble du projet, à toutes les phases du cycle de vie. Il est entendu que les niveaux de détail de la description des différentes phases et des différents segments du projet peuvent être différents au départ. Le processus accompagne le projet pendant toute sa durée de vie. Par conséquent, la documentation doit être régulièrement mise à jour. Le processus enregistre l'état initial de l'environnement, y compris la

nature et une variété d'autres sujets tels que l'urbanisme, la santé publique, la sécurité de la population, les impacts économiques.

Le processus identifie et évalue activement les effets pertinents sur l'environnement du projet (analyse de l'impact environnemental) et contribue au processus de conception en suivant les étapes Éviter, Réduire et Compenser. Le processus comprend la participation de la population, par exemple au moyen d'une phase de dialogue informel et de participation, et d'un processus formel de consultation publique (« débat public ») et d'« enquête publique ». Ces derniers processus sont réalisés par des organismes notifiés nationaux.

Afin d'évaluer correctement les performances en matière de développement durable, le gouvernement français exige une évaluation socio-économique pour chaque projet de plus de 20 millions d'euros financé par des investissements publics. L'évaluation doit être effectuée conformément aux lignes directrices du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) [150]. Les projets dont l'investissement public total est supérieur à 100 millions d'euros font l'objet d'une contre-expertise, sur laquelle le SGPI fournit une évaluation au Parlement français et au Premier ministre, ainsi qu'au ministre compétent pour le projet.

L'évaluation socio-économique comprend une description détaillée du projet, de ses variantes et alternatives, de ses principales caractéristiques, du calendrier de mise en œuvre, d'une liste d'indicateurs socio-économiques pertinents, d'une liste de valeurs d'indicateurs montrant où le projet se situe, par rapport aux politiques publiques (par exemple, les objectifs de réduction de l'impact sur le climat), du plan financier, de la conformité avec les lois et les règlements et d'un registre des risques.

Jusqu'en 2020, les évaluations socio-économiques des programmes et des projets ne portaient que sur des aspects environnementaux limités tels que les habitats et les espaces verts. L'importance croissante de sujets plus globaux a conduit à un élargissement des impacts positifs et des facteurs externes négatifs couverts. Le guide d'évaluation de l'impact pour 2023 en France [150] inclut explicitement tous les aspects environnementaux pertinents pour le projet, tels que les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub>, le bruit, la pollution de l'air, l'utilisation et la pollution de l'eau, l'utilisation et la pollution des sols, et exige que ces aspects soient associés à des valeurs monétaires et que les contributions positives soient quantifiées en termes monétaires. Par exemple, la valeur légale d'une tonne de CO<sub>2</sub> pour l'évaluation socio-économique a été fixée à 32 euros (année de base 2010) dans la ligne directrice 2023, ce qui correspond à environ 40 euros en 2024. Malgré cette valeur, l'annexe qui indique les lignes directrices de la conversion des biens non échangeables et des facteurs externes en termes monétaires indique une progression du coût fictif du carbone de 250 euros par tCO<sub>2e</sub> en 2030 à 775 euros par tCO<sub>2e</sub> en 2050. Cette progression est conforme aux recommandations de la BEI concernant le coût fictif du carbone.

L'évaluation socio-économique du FCC est basée sur une analyse des coûts et des bénéfices standard, présentant une valeur actuelle nette et un ratio bénéfices/coûts basés sur la comparaison des coûts et bénéfices totaux actualisés au cours d'une période d'observation définie. Les coûts et les bénéfices ont été quantifiés par rapport à un « scénario contrefactuel » dans lequel le CERN exploite le LHC jusqu'à sa fin de vie prévue et continue à servir de plateforme de recherche scientifique avec le complexe d'accélérateurs de particules existant. Les effets directs et les facteurs externes, positifs et négatifs notables doivent être pris en considération tout au long du cycle de vie du projet, y compris les effets environnementaux.

Pour le taux d'actualisation social (TAS), les lignes directrices 2023 pour l'impact socio-économique en France [151] recommandent d'utiliser généralement une valeur de 3,2 % pour les projets dont la durée de vie s'étend jusqu'à l'année 2070. Toutefois, pour les projets à très long terme et à faible risque tels que les infrastructures de recherche, un taux d'actualisation social plus faible, de l'ordre de 2,5 %, peut être justifié. Pour l'analyse coûts-bénéfices du FCC, les économistes ont choisi un TAS de 2,8 %, qui repose sur la pondération des TAS dans chaque État membre du CERN en tenant compte de sa contribution financière annuelle au CERN.

S'il existe une « déclaration d'utilité publique » (DUP) régissant le processus d'autorisation des projets d'investissement public, l'évaluation socio-économique fait partie des dossiers d'enquête publique exigés par la loi pour obtenir les autorisations nécessaires au projet.

L'évaluation socio-économique doit être mise à jour régulièrement, en suivant l'approche itérative consistant à affiner le scénario du projet et à comparer les effets attendus aux effets réels une fois le projet mis en œuvre (analyse a posteriori).

Un projet peut être considéré comme durable si les valeurs actuelles nettes socio-économique et financière sont positives. En outre, le taux d'actualisation social appliqué doit être supérieur au coût moyen pondéré du capital nécessaire pour financer le projet. Cela peut être vérifié en déterminant le taux de rendement interne (TRI), qui est étroitement lié au calcul de la valeur actuelle nette. Ce taux indique à quelle valeur du taux d'actualisation social la valeur actuelle nette du projet devient nulle. Par exemple, si les prêts pour le projet sont accordés à 3 % alors que la valeur actuelle nette devient nulle à 5 % seulement, la condition est remplie.

Si le projet ne génère pas de revenus, c'est-à-dire dans le cas d'une infrastructure pour la recherche scientifique fondamentale, aucune valeur actuelle nette financière ne peut être fournie, une valeur actuelle nette socio-économique positive et un taux de rendement interne supérieur au coût du capital répondent à la condition de durabilité. Si la valeur actuelle nette socio-économique est négative et la valeur actuelle nette financière positive, l'investissement peut être financièrement viable, mais il n'est pas recommandé d'un point de vue sociétal.

#### **4.2.5. Le contexte en Suisse**

Le processus d'autorisation en Suisse est basé sur des principes directeurs qui exigent la démonstration de la conformité du scénario avec toutes les lois et réglementations individuelles applicables. Toutes les lois et réglementations applicables au projet doivent être identifiées et énumérées de manière explicite. Une bonne pratique consiste à suivre l'approche « Éviter-Réduire-Compenser » telle qu'elle est exigée en France et en Europe, avec une participation continue des organismes notifiés, des services de l'administration publique et de la population. Cette approche doit être accompagnée de mesures de suivi et d'amélioration continue.

Avec la récente mise à jour de la loi sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation (LERI) [152] et le développement d'un plan spécifique pour les nouvelles constructions et installations du CERN [153], les lignes directrices relatives à la durabilité des infrastructures de recherche deviennent plus spécifiques.

Il convient d'éviter la consommation de terrains, en particulier de terres arables à rotation de cultures de haute qualité, qui sont considérées comme une ressource précieuse. Lorsque cela n'est pas possible, la consommation résiduelle de ces terres enregistrées dans un inventaire national doit, en principe, faire l'objet d'une compensation. Par conséquent, les alternatives et les variantes du projet doivent être documentées et évaluées. Une compensation peut, par exemple, être obtenue en enlevant la couche arable du terrain d'origine concerné et en utilisant cette terre pour créer des terres arables de haute qualité dans un périmètre géographique convenu, par exemple sur des terres en friche ou des sols dégradés. Les autorités facilitent le processus d'identification des zones de compensation appropriées et les procédures administratives.

Le plan sectoriel pour les constructions et installations du CERN ayant des besoins territoriaux (PS CERN) [154] met en évidence un certain nombre de sujets qui doivent être pris en compte lors de l'élaboration de nouveaux projets :

- Les couches aquifères doivent être protégées et ne doivent pas être utilisées pour fournir de l'eau non traitée à des fins de refroidissement. Il faut veiller à ne pas polluer les couches aquifères et à ne pas mélanger les eaux des couches aquifères superposées.
- Des zones tampons d'exclusion à proximité des cours d'eau protègent les habitats.
- Les défrichements sont généralement interdits en Suisse. Une dérogation ne peut être accordée que dans des cas exceptionnels pour des installations d'intérêt public.
- Des mesures doivent être prises pour gérer les eaux de pluie et les eaux usées afin d'éviter les inondations et la pollution de l'environnement. Il en va de même pour la gestion de l'eau utilisée pour éteindre les incendies.
- Les limites d'émissions de poussières et de particules doivent être respectées.
- Les limites des émissions sonores doivent être respectées. En Suisse, les limites d'émission sonore sont absolues et définies pour différentes zones de sensibilité, contrairement à la France, qui considère des limites de bruit relatif par rapport au bruit de fond existant.

- Des mesures doivent être prises pour gérer les déchets de toute nature pendant toutes les phases du projet.
- Les objectifs nationaux et cantonaux en matière d'énergie et de protection du climat doivent être pris en compte lors de la planification, de la construction et de l'exploitation des futures installations de recherche. La consommation d'énergie doit être réduite à un minimum compatible avec la capacité d'atteindre les objectifs de la recherche scientifique.
- Les émissions de gaz à effet de serre doivent être réduites à un minimum dans les limites nécessaires pour atteindre les objectifs scientifiques et répondre aux exigences du projet.
- La conception et la mise en œuvre des systèmes techniques doivent intégrer l'optimisation de l'efficacité énergétique, ainsi que la récupération et l'utilisation de la chaleur fatale. Les capacités et les caractéristiques disponibles pour un usage interne et externe doivent être identifiées et documentées.
- Les bâtiments doivent être conformes aux réglementations nationales en matière d'efficacité énergétique.
- En général, tout effort d'optimisation et de réduction est censé être conditionné par la faisabilité technique et la viabilité économique. Ces efforts doivent toujours être compatibles avec la possibilité d'atteindre les objectifs de recherche scientifique spécifiés.
- Un plan de mobilité qui soutient les plans climatiques nationaux et cantonaux doit être développé. Les places de stationnement doivent être optimisées, conformément aux réglementations en vigueur.

### 4.3. Méthodologie

L'étude a adopté l'approche et la méthodologie nécessaires à la réalisation d'une évaluation quantitative complète et plus large de la durabilité, basée sur la méthodologie bien établie de l'analyse des coûts et des bénéfices [155] définie par la Commission européenne et la Banque européenne d'investissement et telle qu'elle est décrite dans les lignes directrices nationales du type de celle de la France [150]. Une telle évaluation comprend l'identification et la quantification des coûts, des bénéfices et des facteurs externes positifs et négatifs.

L'objectif est de présenter un scénario d'implantation susceptible d'être durable à long terme et pour lequel les performances en matière de développement durable peuvent être continuellement améliorées par rapport à une prévision initiale servant de référence. L'approche permet d'analyser des variantes et d'établir des conditions limites de durabilité.

Dans le cadre d'une approche fondée sur le cycle de vie, une bonne pratique consiste à élaborer une évaluation initiale des coûts et des bénéfices le plus en amont possible, au stade de la préfaisabilité, et à l'actualiser régulièrement à mesure que les principales caractéristiques du projet continuent d'être ajustées pendant la phase de conception et même pendant la réalisation. Cette approche permet de résoudre la difficulté que représente l'impossibilité de couvrir de manière exhaustive les coûts et les bénéfices et de se concentrer sur une bonne compréhension des principaux facteurs de durabilité et des risques.

L'analyse de la durabilité est une composante nécessaire à une prise de décision éclairée. L'évaluation du projet et de la durabilité du projet de recherche scientifique ne permet, cependant, pas d'appréhender l'opportunité et la valeur de la mission scientifique sous-jacente. Les indicateurs ne doivent donc pas être utilisés pour comparer des projets de recherche ou pour faire un choix d'investissement entre plusieurs projets.

Pour être utile lors de l'autorisation, de la mise en œuvre et de l'exploitation du projet, celui-ci doit prévoir un contrôle et un suivi périodiques de la durabilité tout au long de sa durée de vie et mettre en œuvre un processus d'amélioration itératif suivant le principe standard « Planifier-Développer-Contrôler-Ajuster », que ce soit au niveau de l'infrastructure ou pour les nouveaux programmes et projets.

L'évaluation (ou analyse) du cycle de vie (ACV) [156, 157] est une méthodologie qui convient aux différents segments d'un projet. Elle permet d'évaluer un ensemble d'aspects environnementaux pertinents pour atteindre la durabilité. Son objectif et sa portée doivent être bien définis et ses résultats doivent être intégrés dans l'évaluation globale du projet et de la durabilité. Lors de la réalisation d'une ACV, il faut veiller à être aussi précis que possible et à documenter de manière exhaustive la variante de scénario et la version évaluée, les hypothèses, les paramètres d'entrée, la qualité des données et la procédure d'attribution (algorithmes et outils) afin de garantir que les résultats ont une valeur significative pour l'évaluation. L'ACV n'est pas en

mesure de saisir tous les aspects environnementaux pertinents et ne remplace donc pas une évaluation des incidences sur l'environnement. Elle ne peut donc pas être utilisée pour rendre compte de la performance environnementale globale d'un projet.

Pour une évaluation complète de la durabilité, une méthode quantitative d'analyse coûts-bénéfices (ACB) fondée sur les connaissances économiques les plus récentes et intégrant les coûts totaux, les facteurs externes négatifs (y compris les facteurs externes environnementaux) et les bénéfices industriels, sociaux et environnementaux constitue l'approche privilégiée qui est adoptée. Une description plus complète de l'approche est donnée à la section 4.5.

Les développeurs de projets doivent se tenir au courant des réglementations nationales et internationales et des cadres juridiques au cours de la phase de conception et de la phase préparatoire qui suit. Elles doivent continuellement améliorer leurs connaissances sur les méthodes d'évaluation des projets les plus modernes et le développement d'approches pour convertir les impacts positifs et négatifs et les facteurs externes en termes quantitatifs, afin de présenter un indicateur global de durabilité sous la forme d'une valeur actuelle nette et d'un ratio bénéfices/coûts du projet. C'est pourquoi, tant que des connaissances et des hypothèses supplémentaires sur le scénario du projet et ses principales caractéristiques sont développées, le ratio coûts-bénéfices (BCR) et le taux de rendement interne (TRI) évoluent tout au long des phases du cycle de vie.

#### 4.4. Facilitateurs de durabilité socio-économique

##### 4.4.1. Voies d'impact

Les voies d'impact socio-économique constituent un inventaire précieux des facteurs de durabilité. Basé sur le concept de « théorie du changement » [158], le projet RI-PATHS financé par l'UE a développé une boîte à outils [159], fédérant des infrastructures de recherche dans divers domaines, y compris les installations d'accélérateurs de particules telles que ALBA, CERN et DESY. Les principales voies d'impact caractéristiques pour les installations à base d'accélérateurs de particules sont présentées à la Fig. 4.4. Cette section décrit brièvement comment ces voies peuvent conduire directement à des bénéfices et à des facteurs externes positifs et donne quelques exemples spécifiques.

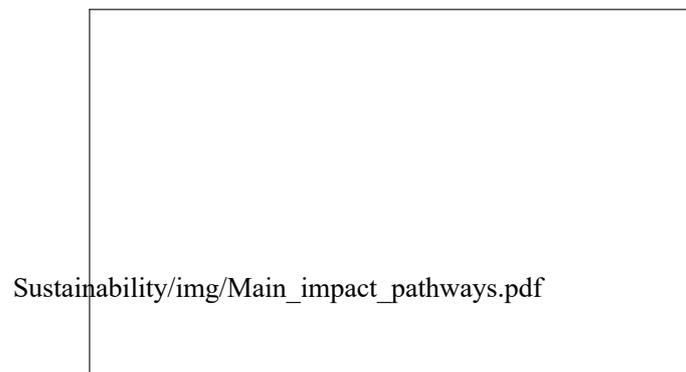


Fig. 4.4 : Principales voies d'impact socio-économique favorisant la durabilité des infrastructures de recherche sur les accélérateurs de particules et la physique des particules.

Dans le cadre de futurs projets, la réalisation d'une cartographie complète des potentiels des voies d'impact et un développement des mesures favorisant la durabilité autour d'une telle activité systématique d'exploration et de conception sont vivement encouragés.

## *Connaissances en physique fondamentale*

La science est une connaissance formalisée qui peut être expliquée de manière rationnelle et testée, par rapport à la réalité, à la logique et à l'examen par les pairs, et qui constitue un bien public mondial [160]. En fin de compte, il s'agit du principal extrant des infrastructures de recherche. Dans notre société en mutation, la connaissance est sur le point de devenir la ressource économique de base, remplaçant progressivement le capital, la terre et le travail. Il est prouvé que le secteur public a financé et continue de financer une grande partie de la science innovante qui stimule les réponses du secteur privé [161]. Mais quelle est la valeur des connaissances générées par les projets de science fondamentale ? Les investissements continus dans de nouveaux projets d'accélérateurs de particules pour la recherche scientifique sont-ils durables aux yeux des personnes qui n'utilisent pas directement ces instruments et qui ne profitent pas directement des connaissances générées ? Quels sont les moyens disponibles pour évaluer la valeur de ces investissements ?

Les accélérateurs de particules destinés à la science fondamentale peuvent ou ne peuvent pas générer des connaissances pouvant être utilisées directement par la société. D'autres accélérateurs de particules, tels que les sources de rayonnement synchrotron, servent généralement à la recherche appliquée. Cela signifie qu'une limite inférieure de la valeur des connaissances générées peut être quantifiée en termes de coût des publications, de frais d'utilisation de l'installation et de ressources que les utilisateurs investissent dans cette recherche. L'approche repose sur l'hypothèse que les résultats de la recherche aboutissent finalement à des produits et services utilisés par la société. Un exemple en est la caractérisation de la structure du virus COVID-19 avec le synchrotron BESSY-II [162]. Les accélérateurs de particules et les collisionneurs qui servent la recherche axée sur la curiosité, comme le LHC ou le collisionneur électron-ion, ne peuvent pas utiliser ce modèle, car il n'est pas certain que les connaissances acquises déboucheront sur des applications sociétales directes. Il ne fait toutefois aucun doute que les résultats scientifiques font progresser la société. Ce point de vue est partagé par la majorité des personnes, même si l'actif concerné n'est pas directement utilisé.<sup>5</sup>

La validité de l'approche est démontrée par l'attribution de plusieurs prix Nobel d'économie pour des avancées dans ce domaine. Il est prouvé que ce processus de génération de valeur est d'une importance fondamentale pour la société et l'économie du bien-être [163–168].

Pour saisir la valeur que les missions scientifiques et les infrastructures de recherche représentent pour les profanes qui ne peuvent pas les utiliser directement, il est possible d'avoir recours à des méthodes qui ont été développées à l'origine pour élucider la valeur de bien public des espaces récréatifs en plein air [169], pour identifier les niveaux de valeur appropriés pour les mesures de protection de l'environnement [170], pour déterminer les niveaux adéquats de mesures d'atténuation des incidents environnementaux [171] et pour déterminer les niveaux d'investissement nécessaires pour protéger le patrimoine naturel et culturel. Cette approche a d'abord été utilisée pour estimer la valeur du projet LHC [172], puis pour le projet HL-LHC [173] et elle est maintenant utilisée pour le FCC [174]. Cette approche a récemment été également adoptée par une infrastructure de recherche sur l'atmosphère [175]. En bref, la valeur que les gens associent à un projet scientifique peut être appréhendée en estimant leur volonté de participer financièrement à l'aide d'approches bien établies en économie, telles que l'évaluation contingente, encore appelée « préférence déclarée ».

L'évaluation des impacts non marchands est difficile, mais elle pourrait être entreprise dans la mesure du possible et le « programme de l'Union européenne pour une meilleure réglementation » indique les instruments pour y parvenir [176]. Cela permettra de mieux comprendre la perception du public à l'égard de la vision scientifique et de tester la validité de l'hypothèse de durabilité du financement public, c'est-à-dire de préciser quel est le niveau d'investissement périodique qui est justifié d'après la perception du public. Pour concevoir, planifier et réaliser une estimation de la valeur du bien public, il faut faire appel à des experts du domaine et à des entreprises qualifiées. Il est important de veiller à ce que cette volonté de participer à une analyse, reposant généralement sur des enquêtes, soit effectuée en toute indépendance, sans l'influence du maître d'ouvrage et conformément aux lignes directrices internationales en matière d'éthique et aux normes de qualité exigées pour les analyses basées sur des enquêtes. On trouvera des exemples de cette approche dans les références [174, 177].

En fonction du nombre de pays ou d'organismes de financement à même de réaliser le projet, une telle enquête peut nécessiter des ressources considérables. Les économistes utilisent donc des techniques basées sur la « méthode du transfert de bénéfices » [178] pour estimer la valeur perçue d'une grande population sur la base de l'identification de quelques paramètres significatifs qui peuvent être dérivés d'un nombre limité

d'échantillons. Ces paramètres peuvent varier d'un projet à l'autre. Par conséquent, une telle étude nécessite une phase pilote pour déterminer les paramètres significatifs, suivie d'une enquête de masse pour déterminer la valeur que le public associe à l'investissement.

La notion qui préside à ce concept est celle de « bien public » par opposition au « bien commun » qui est utilisé de façon conjointe. Les réserves halieutiques dans l'océan et les routes maritimes publiques sont des exemples de biens communs. La connaissance, le patrimoine naturel et culturel sont des exemples de biens publics, de même que les logiciels ouverts et les open data, voire les biens matériels tels que l'éclairage public.

Si la volonté estimée de participer financièrement est supérieure à la contribution réelle ou attendue au nouveau projet prévu, la valeur du bien public constitué par l'infrastructure financée peut être considérée comme cohérente avec la participation financière et donc également être considérée comme justifiée. Si le consentement à participer est inférieur à la contribution réelle ou prévue, il y a un écart entre la valeur perçue par les personnes et la contribution fournie. Dans ce cas, le projet doit être revu.

### ***La durabilité par l'éducation et la formation***

Les accélérateurs de particules et les infrastructures de recherche en physique expérimentale offrent la possibilité d'engager des personnes à tous les niveaux d'éducation et de formation, des apprentis aux chercheurs postdoctoraux. Si les gens ont la possibilité de participer activement à la conception, à la construction et à l'exploitation de ces projets et programmes, ils bénéficient d'avantages qui se traduisent directement par une prime salariale à vie de 2 à 10 % [122,179], par rapport à leurs pairs inscrits dans des programmes de formation conventionnels dans les écoles et les universités. Un programme spécifique visant à intégrer les personnes, après leur période d'activité dans une installation de recherche, sur le marché du travail de leur pays ou région d'origine peut améliorer de manière significative le retour sur investissement pour le pays ou la région participant au projet [180].

### ***Durabilité grâce à la participation des communautés scientifiques internationales***

La participation d'une communauté de scientifiques et d'ingénieurs très importante et en croissance constante, sous la forme de projets de recherche collaboratifs sur de longues périodes, garantit la viabilité à long terme d'un projet ou d'un programme scientifique. Les raisons en sont les suivantes :

- Les frais de personnel sont répartis entre de nombreuses organisations et pays contributeurs ;
- Une génération stable de productions scientifiques [181,182] (c'est-à-dire les livres, les articles évalués par les pairs, les prépublications et les rapports techniques, les actes et les présentations) peut être garantie.
- Les connaissances peuvent être transférées efficacement dans des programmes d'enseignement durables par le biais de publications et d'une formation directe au fil des générations.
- L'impact peut être généré par la formation de professionnels en début de carrière (voir section précédente).

La valeur élevée est principalement obtenue en s'assurant que les productions scientifiques générées directement par le projet ou le programme de recherche sont effectivement repris et cités par une communauté de deuxième niveau encore plus importante. La diffusion en libre accès de publications fiables (évaluées par des pairs) est une condition préalable pour assurer la durabilité de l'infrastructure de recherche par la création de productions scientifiques. Enfin, le concept d'innovation ouverte qui implique un grand nombre de domaines de connaissances autour d'une mission scientifique centrale garantira que la probabilité de génération de connaissances stimulée par les difficultés de la mission scientifique finira par se répercuter sur la société dans des domaines qui sont immédiatement pertinents pour elle [183].

### ***Durabilité grâce aux retombées industrielles***

Les retombées industrielles des projets scientifiques génèrent des bénéfices directs pour l'industrie et la société [184–186]. Cette voie d'impact a une efficacité maximale si les projets scientifiques construisent leurs instruments et leurs infrastructures en collaboration avec des partenaires industriels [187–189]. Cela fonctionne mieux lorsque les entreprises travaillent en étroite collaboration avec le projet de recherche pour développer des solutions à forte intensité technologique et fournir des services non standardisés [190]. Cette approche est plus laborieuse qu'une relation client/fournisseur classique car elle nécessite des échanges d'idées et de connaissances, le développement de processus intégrés, l'adaptation mutuelle des méthodologies de travail et un partage des risques. Ce processus conduit toutefois à la création de processus, de produits et de services durables que les partenaires industriels peuvent exploiter sur d'autres marchés, avec des multiplicateurs de gains supérieurs à 3 et des effets qui peuvent durer entre cinq et huit ans. Des effets territoriaux durables ont également été documentés de manière fiable [191,192].

La durabilité dépend également de la conception de la mission scientifique : les programmes de courte durée et non évolutifs entraîneront des retombées industrielles plus faibles et de plus courte durée que les programmes de longue durée caractérisés par des mises à niveau périodiques et des mesures d'amélioration de l'efficacité opérationnelle impliquant des partenaires industriels dans des activités continues basées sur des défis à relever.

Les retombées industrielles peuvent également entraîner des facteurs externes environnementaux positifs durables. La difficulté que représente la réduction de l'empreinte carbone et de l'impact environnemental de la construction d'un nouvel accélérateur de particules crée une opportunité d'innovations industrielles dans de nombreux domaines liés à la construction. Par exemple, elle induit un potentiel de développement ou de mise en place d'installations de production de béton et d'autres matériaux de construction à faible émission de carbone. Cela sert de plateforme pilote pour l'amélioration des techniques de construction, par exemple en utilisant des ressources naturelles telles que le bois et la terre comprimée. La présentation de l'application suscite l'intérêt du marché. La mise au point de procédés et de produits pour l'utilisation des matériaux excavés peut générer des bénéfices allant bien au-delà des besoins du projet d'infrastructure de recherche, car la gestion des déchets de construction est un problème auquel la société est confrontée et pour lequel les projets de construction conventionnels ne disposent généralement pas de suffisamment de temps et de budget. L'architecture industrielle basée sur l'éco-conception est une autre discipline émergente pour laquelle les accélérateurs de particules constituent des adeptes précoces appropriés. Des bénéfices environnementaux peuvent également être générés dans le domaine des infrastructures techniques développées avec des partenaires industriels. Il s'agit notamment :

- de systèmes de réfrigération plus efficaces qui trouvent leur application, par exemple dans la liquéfaction et le transport des gaz ;
- de systèmes de refroidissement par eau plus efficaces (prise d'eau adaptée, utilisation des eaux usées) ;
- de l'amélioration des systèmes électriques (réduction des pertes grâce à des systèmes à courant continu) ;
- de la gestion du contrôle de la puissance à grande vitesse ;
- du stockage d'énergie à court et moyen terme ;
- d'opérations d'infrastructure adaptatives et fondées sur l'apprentissage automatique ;
- du stockage et de la distribution de la chaleur fatale.

### ***Durabilité grâce aux technologies ouvertes de l'information et de l'informatique***

Le développement des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la production de données largement disponibles ne se limitant pas aux résultats scientifiques (par exemple, les données des essais techniques, le suivi des opérations, les essais des systèmes, etc.) sont des résultats essentiels des infrastructures de recherche basées sur les accélérateurs de particules [193]. La mise en place d'une infrastructure mondiale de partage et de traitement des données a déjà conduit à la création de nombreux

logiciels, plateformes et services en ligne librement accessibles, qui sont également utilisés dans des environnements, autres que la physique, des hautes énergies et qui vont du stockage de données évolutif et des intergiciels de distribution à la gestion des données et aux systèmes de flux de travail, en passant par l'analyse et la visualisation des données. En outre, des logiciels librement accessibles ont été développés, dont la valeur va au-delà des collaborations scientifiques. Parmi les exemples, on peut citer les services innovants d'informatique sur le Cloud (par exemple, Helix Nebula Science Cloud, utilisable dans cinq domaines de recherche scientifique), les logiciels de gestion des réunions et des événements (par exemple, Indico), la modélisation et l'analyse des interactions entre les particules et la matière (par exemple, GEANT4, FLUKA et ACTIWIZ) et les logiciels de bibliothèque électronique et d'accès à l'information (par exemple, Invenio et Zenodo). La conservation des données à long terme est un autre domaine technologique d'une grande importance sociétale qui gagne en importance et qui est principalement stimulé par les infrastructures de recherche en science fondamentale.

Les projets de recherche sur les accélérateurs de particules et la physique des hautes énergies sont vivement encouragés à dresser un inventaire des outils TIC potentiels qui peuvent être mis à la disposition de la société dans son ensemble, de manière ouverte et gratuite. La possibilité de quantifier l'impact sociétal de ces solutions dépend fortement de la comptabilisation de l'adoption et de l'utilisation des logiciels (par exemple, le nombre d'installations, le nombre de fois où il a été intégré dans des logiciels commerciaux et d'autres logiciels ouverts) sur des périodes prolongées. Aujourd'hui, cette comptabilisation fait défaut, ce qui rend l'estimation quantitative de l'impact sociétal difficile et laborieuse.

Cependant, il est important de mettre en place une surveillance et une évaluation systématiques, car les outils TIC développés dans l'environnement scientifique ont un impact majeur avec des potentiels de valeur significatifs et tangibles [194,195].

Les logiciels ouverts et librement accessibles développés et maintenus par les projets et programmes scientifiques sont des facteurs de durabilité pour les infrastructures de recherche. Leurs coûts d'investissement, de développement continu et de maintenance sont marginaux, par rapport aux bénéfices sociétaux qu'ils peuvent générer au fil des décennies. Les futurs projets et programmes d'accélérateurs de particules devraient se concentrer sur la gestion et la promotion adéquates des développements en matière de TIC et s'assurer qu'ils sont adoptés par la société grâce à un processus d'exploitation des compétences technologiques et à une présence en ligne soutenue dans les domaines d'utilisation potentiels.

### ***La durabilité grâce aux biens culturels***

Susciter l'intérêt de tous les citoyens pour la science fait partie de la mission de toute infrastructure de recherche. Les projets et les organisations peuvent développer un large éventail d'activités pour attirer les profanes, par exemple au moyen d'expositions permanentes et itinérantes, de journées portes ouvertes, de visites guidées, d'un engagement vis-à-vis des écoles et des enseignants dans des ateliers communs, de projets scientifiques citoyens, de sites web, de médias sociaux, d'un engagement vis-à-vis de blogueurs vidéo, de documentaires en ligne et télévisés, de stages artistiques, de projets artistiques communs, de longs métrages, de livres, de foires scientifiques, d'une présence dans des émissions de radio et de télévision et bien d'autres choses encore. La seule limite de la création de biens culturels est celle de l'imagination d'un groupe de personnes créatives en constante évolution et diversifié, qui est le mieux à même d'être employé sur des périodes prolongées. Chacun de ces biens culturels a la capacité de générer de la valeur pour la société. Le fait de susciter un intérêt constant pour le projet scientifique fait tomber les barrières et les craintes des personnes qui ne font pas partie de la communauté scientifique.

Il est important que les projets d'accélérateurs de particules et de physique fassent participer les profanes de manière ludique et divertissante plutôt que de viser l'éducation et l'enseignement, qui constituent une voie d'impact socio-économique différente. Les deux doivent être séparés, bien qu'une création et un engagement culturels efficaces permettent d'expliquer la science sous-jacente dans une deuxième étape.

L'identification de la valeur des biens culturels peut être très différente pour chaque bien. Par conséquent, les futurs projets et programmes devront se concentrer dans un premier temps sur quelques filières culturelles. Si la valeur estimée d'une filière s'avère avoir un potentiel suffisant, il convient de la développer davantage en vue d'un engagement durable. Un contrôle continu de la valeur doit être effectué.

La valeur des visites sur place représente un bien culturel des infrastructures scientifiques qui peut générer une valeur économique substantielle et durable [196, 197]. Ces visites comprennent la découverte de l'environnement et de la nature [198, 199]. Cette activité devrait donc être la première à être envisagée pour le développement.

La présence sur les réseaux sociaux est celle qui a le plus d'impact sur les biens culturels en ligne à l'heure actuelle et doit donc être considérée comme une priorité [118]. Il est particulièrement important de susciter un intérêt constant pour la science et d'expliquer de quelle manière la science influe sur l'environnement et la vie quotidienne des gens. Différents moyens de communication sont nécessaires pour les différentes générations et les différents groupes socio-économiques [200].

Enfin, les projets scientifiques citoyens à la périphérie de la mission de la science physique sont des outils efficaces pour intéresser les profanes et renforcer la compatibilité environnementale et territoriale de l'infrastructure de recherche. Les initiatives visant à créer des inventaires de la biodiversité sur les sites de surface afin d'améliorer la qualité des habitats sur les sites et tout autour, en sont un exemple.

### ***Durabilité grâce à des facteurs externes environnementaux positifs***

Tout projet basé sur un futur accélérateur de particules a la capacité de créer des facteurs externes environnementaux positifs qui peuvent compenser les effets négatifs résiduels et inévitables sur l'environnement qu'il n'est pas possible de réduire davantage. Avant d'élaborer des mesures de compensation et d'accompagnement, il convient d'éviter les effets négatifs sur l'environnement. S'ils ne peuvent être évités, ils doivent être réduits dans la mesure où cela est compatible avec la réalisation des buts et objectifs de l'infrastructure dans le respect des contraintes de coût et de calendrier accepté.

Les cadres juridiques et réglementaires nationaux et internationaux définissent les conditions limites de l'approche d'évitement, de réduction et de compensation. La récente mise à jour de la loi sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation en Suisse, par exemple exige explicitement la prise en compte des plans nationaux et régionaux de protection du climat et des aspects liés à l'énergie [201]. D'autres pays, comme la France, ont déjà inscrit la lutte contre le changement climatique, la protection des ressources et de la biodiversité, l'économie circulaire et le développement territorial durable dans les lois de protection de l'environnement (L110-1 [147] et [202]) qui régissent l'autorisation de nouveaux projets [202]. Par conséquent, le terme « environnemental » doit toujours être interprété au sens large. Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre définis par l'Accord de Paris doivent être intégrés dans les nouveaux projets au niveau de l'UE et en suivant leur transposition dans les lois nationales [203].

Si elle est correctement planifiée, évaluée et contrôlée, la compensation collective peut même avoir un effet positif net [204]. La Suisse ne prévoit pas une telle approche et exige une compensation basée sur une surface et une qualité équivalente en principe dans le canton concerné [205–207]. Malgré cette contrainte, la performance environnementale globale peut encore être neutre ou positive du point de vue de l'évaluation socio-économique si les facteurs externes environnementaux positifs sont correctement évalués et intégrés dans la valeur actuelle nette du projet.

Voici quelques exemples types de facteurs externes environnementaux positifs que les installations d'accélérateurs de particules peuvent intégrer dès le départ dans leur conception :

- Recréation d'espaces agricoles en transférant de la terre arable vers des parcelles de faible qualité et des friches ;
- Création d'espaces verts avec des routes couvertes, fertilisation de friches et de carrières remblayées, création de parcs, végétalisation de toits, reboisement autour des sites, création et amélioration de la qualité d'habitats naturels et de zones humides ;
- Favorisation de la biodiversité par la création de nouveaux habitats sur le domaine de l'infrastructure de recherche ;
- Amélioration ou création de nouveaux corridors écologiques, de continuités vertes et bleues ;
- Création de forêts avec des arbres et des plantes adaptés au changement climatique ;

- Introduction de la gestion forestière en vue de la prévention des incendies de forêt ;
- Amélioration de la gestion des cours d'eau existants, mais de faible qualité ;
- Création de réservoirs d'eau ;
- Création de haies surélevées pour lutter contre l'érosion des sols et créer de nouveaux habitats ;
- Création de concepts de mobilité douce ou multimodale destinés à être utilisés au-delà de l'installation de recherche ;
- Création et amélioration d'habitats naturels et de zones de protection de la nature sur les sites des infrastructures de recherche ;
- Réduction de l'empreinte carbone en contribuant à éviter d'utiliser les combustibles fossiles grâce à la distribution de chaleur fatale ;
- Distribution d'eau non traitée à des fins non potables par la distribution d'eaux usées purifiées lorsqu'elles ne sont pas utilisées par l'installation de recherche ;
- Augmentation des capacités des ressources en énergies renouvelables par le biais de contrats d'achat d'électricité et de communautés d'achat d'énergie à long terme ;
- Développement de produits et de processus qui s'appuient sur les principes de l'économie circulaire et sur des technologies à faible impact environnemental, qui s'étendent au domaine industriel (par exemple, dans les domaines des sous-stations électriques, des matériaux de construction, des solutions architecturales, de la transmission et du stockage de l'énergie, du refroidissement industriel) ;
- Démantèlement des infrastructures qui ne sont plus utilisées pour créer de la valeur environnementale et sociétale.

#### ***4.4.2. Innovation et R&D***

Les accélérateurs de particules et les détecteurs pour les expériences aux points de collision des collisionneurs de particules sont des projets qui font appel à des technologies de pointe sur des périodes s'étalant sur plusieurs décennies. Par conséquent, ils ont tendance à se développer et à faire appel à des technologies qui n'existent pas au moment de la conception. Ce processus se poursuit pendant toute la durée de l'opération, au fur et à mesure que les détecteurs sont mis à niveau. Les avancées techniques requises peuvent être conçues en interne et/ou dans des institutions partenaires (telles que des universités) en collaboration avec des entreprises externes. Le développement peut prendre la forme d'une conception conjointe ou de l'acquisition de technologies à développer par l'entreprise. Dans les deux cas, les industries bénéficient d'un transfert de connaissances technologiques qui peut déboucher sur des percées technologiques, des brevets ou de nouvelles opportunités commerciales [208,209]. Ces processus sont encouragés et accompagnés par des centres de transfert de connaissances (TC) spécialisés au sein des organisations participantes. [210–213] En tant que catalyseur de la mission scientifique, ce progrès technologique est un résultat précieux, qui influe de manière significative sur la durabilité sociale d'un projet.

#### ***Autres potentiels de développement durable***

Les projets scientifiques internationaux tels que le FCC offrent également la possibilité de développer les compétences non techniques et la coopération internationale. Ces projets rapprochent les nations dans la poursuite d'un objectif commun et pacifique. Comme on l'a vu récemment lors des cérémonies du 70e anniversaire du CERN, des chefs d'État et des ministres viennent visiter le site et ont des discussions bilatérales qui peuvent ou non être liées à la mission scientifique du projet, ou même à la science. Les médias nationaux ont rendu compte de l'événement en mettant l'accent sur le projet commun et sur ces aspects secondaires. Souvent, la question de savoir qui discute avec qui est considérée comme plus importante que l'événement lui-même. La collaboration menant à plus de collaboration, il y a un intérêt sociétal à rassembler les décideurs pour discuter des questions de l'heure dans un cadre informel. Issu de la recherche scientifique sur les accélérateurs de particules, le projet SESAME en Jordanie [214] a été mis en place dans une optique de collaboration internationale, autant, voire plus, que le projet scientifique proposé. Les installations de

Heidelberg, du CNAO et de MedAustron pour la thérapie du cancer par ions légers sont des exemples concrets de transfert direct de connaissances, d'expertise, de compétences et de technologies à partir de la physique fondamentale des particules et de la recherche sur les accélérateurs de particules vers des applications sociétales significatives. Un futur collisionneur circulaire peut réaliser tout cela pour l'Europe et au-delà.

#### 4.5. Évaluation complète des performances de durabilité sur la base d'une analyse des coûts et des bénéfices

L'approche consiste à créer un inventaire des éléments de coûts négatifs et de bénéfices positifs, y compris les facteurs externes et à les convertir en termes monétaires qui sont combinés pour déterminer une valeur actuelle nette (VAN) de l'investissement à la fin d'une période d'observation choisie (voir Fig. 4.5). Le ratio des bénéfices d'un projet, par rapport à ses coûts (BCR), y compris les facteurs externes, et le taux de rendement interne (TRI) sont deux mesures qui peuvent être dérivées de cette analyse pour fournir des informations précieuses sur la durabilité de l'activité entreprise. Le TRI est le taux d'actualisation qui ramènerait à zéro la VAN de l'ensemble du projet au cours de la période d'observation. Un investissement peut être considéré comme durable s'il est financièrement réalisable (flux de trésorerie net non nul) et rentable d'un point de vue socio-économique. Un BCR positif a été déterminé grâce à une évaluation complète de l'impact socio-économique sur la base des hypothèses les plus prudentes, y compris les coûts totaux, les facteurs externes et les bénéfices et d'un TRI supérieur au coût d'obtention du capital nécessaire. Ces résultats soutiennent la durabilité globale du projet.

Sustainability/img/NPV\_formula\_image.pdf

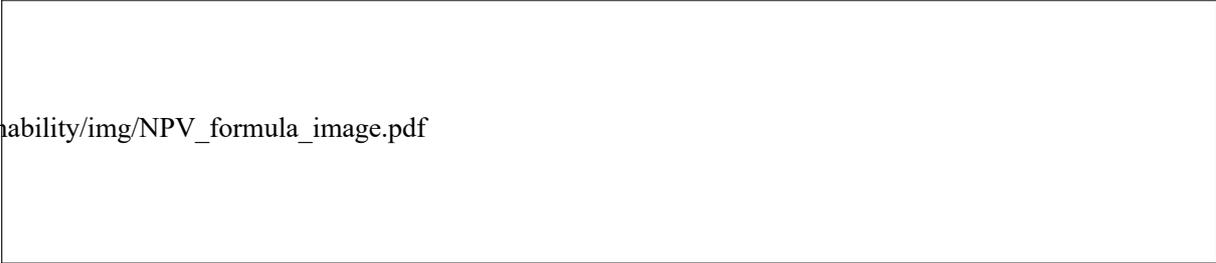


Fig. 4.5 : Expression permettant de déterminer la valeur actuelle nette (VAN) d'un projet d'investissement en tenant compte des aspects économiques, sociétaux et environnementaux.

Conformément aux lignes directrices sur l'estimation des coûts des infrastructures de recherche [215], les éléments suivants doivent être établis :

1. Unité d'analyse avec des descriptions claires du champ d'application et des limites ;
2. Période de référence avec une date de début et une date de fin de l'observation en fonction de la durée de vie utile prévue (il est à noter que cette période peut être différente de la durée de vie physique de l'infrastructure et peut conduire à des valeurs d'actif résiduelles) ;
3. Année de référence, c'est-à-dire le moment où l'estimation quantitative est effectuée et qui ne coïncide pas nécessairement avec la date de début de l'investissement ou de la réalisation du projet. Les valeurs passées sont capitalisées et les valeurs futures sont actualisées par rapport à l'année de référence en utilisant la même formule mathématique. Les taux de conversion de l'unité de mesure, par rapport à d'autres devises pertinentes doivent être enregistrés pour l'année de base ;
4. Unité de mesure des coûts et des bénéfices dans une devise monétaire spécifique ;
5. Approche pour la conversion des contributions en nature en termes monétaires ;
6. Définition et description du scénario contrefactuel ;
7. Taux d'actualisation social spécifique au projet, justifié par un comité consultatif d'experts économistes ;
8. Structure des dépenses d'investissement et de fonctionnement ;
9. Prise en compte de la structure des facteurs externes négatifs ;
10. Structure des impacts positifs (bénéfices) pris en compte.

Outre les coûts financiers complets, les facteurs externes négatifs doivent être intégrés dans l'évaluation, dans la mesure où ils peuvent être raisonnablement identifiés, comptabilisés et convertis en termes monétaires.

En ce qui concerne les impacts éventuels sur le climat, la méthodologie comprend la prise en compte des facteurs d'émission pertinents pour le projet, l'estimation des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) (facteur externe négatif) et des émissions évitées (impact ou bénéfice positif) par rapport à un scénario de référence contrefactuel. La quantité résultante d'émissions de GES générées et évitées, exprimée en tonnes d'équivalent dioxyde de carbone (tCO<sub>2</sub>e), doit être convertie en termes monétaires à l'aide d'un prix fictif du carbone. Conformément aux orientations techniques de la CE sur l'adaptation des infrastructures au changement climatique [216], il est recommandé, pour le coût fictif du carbone, d'utiliser les valeurs établies par la Banque européenne d'investissement (BEI), qui constituent les meilleures données disponibles sur le coût de réalisation des objectifs de l'Accord de Paris [217]. L'Accord de Paris est un traité international juridiquement contraignant sur le changement climatique. Il a été signé par 196 parties lors de la conférence des Nations Unies sur le changement climatique (COP21) à Paris, le 12 décembre 2015. Il est entré en vigueur le 4 novembre 2016.

L'analyse des entrées-sorties [218] est une méthodologie qui prend en compte uniquement les liens économiques et détermine la valeur ajoutée d'un investissement. Elle peut servir à estimer l'effet sur le marché de l'emploi et dans quels domaines et régions géographiques les activités économiques ont lieu. Cet outil est régulièrement utilisé par les gouvernements et au niveau international (par exemple, l'UE, l'OCDE) pour la recherche économique empirique et l'analyse structurelle. Il est donc largement connu. Il s'agit néanmoins d'un instrument purement économique qui ne doit être utilisé que de la manière suivante :

- En tant qu'outil complémentaire pour documenter les liens économiques, permettant le développement des contributions internationales en espèces et en nature ;
- Pour identifier les secteurs industriels concernés par le projet ;
- Pour développer des activités communes et des synergies ciblées
- Pour comprendre les implications sur le marché du travail ;
- Pour développer des politiques de spécialisation régionale ;
- Pour élaborer des plans de formation ciblés et de mobilité de la main-d'œuvre qualifiée.

Récemment, l'étude du FCC a mis en œuvre la recommandation des économistes d'effectuer une analyse complémentaire de la perception du public [177] en faisant appel à une approche fondée sur les préférences déclarées et le consentement à participer financièrement (WTP) [219].

Une telle analyse peut aider à révéler si les coûts totaux et les impacts cumulés d'une infrastructure de recherche ou d'un investissement scientifique sont au moins justifiés du point de vue de la perception du public.

L'établissement d'un registre des risques, d'une évaluation des risques et d'une évaluation des risques résiduels est important pour les nouvelles missions scientifiques et les projets et programmes d'infrastructure de recherche. Il convient d'y inclure les domaines économique, social et environnemental, en plus des sujets habituels tels que les questions financières et de gestion de projet. Les chapitres sélectionnés doivent être analysés à l'aide d'une procédure d'évaluation simplifiée comportant une ACB limitée et autonome ou une analyse multicritère (AMC). La présentation de plusieurs variantes et versions du projet et de ses différents segments, avec leurs coûts financiers complets et leurs niveaux de performances économique, sociale et environnementale, est considérée comme une bonne pratique d'évaluation de projet et a été mise en œuvre dans le cadre de la présente étude.

Les résultats de l'analyse intégrée et de l'analyse plus large sur le développement durable sont présentés sous forme de résumé à l'aide des indicateurs de performance clés suivants :

La valeur actuelle nette (VAN) est la somme actualisée de tous les bénéfices futurs moins la somme actualisée de tous les coûts futurs sur l'ensemble de la période d'évaluation. Pour estimer correctement la VAN, il faut disposer d'estimations réalistes des flux de bénéfices et de coûts au cours de la période d'évaluation qui peut raisonnablement porter sur une trentaine d'années. Au-delà de cette période, les estimations socio-économiques quantitatives deviennent difficiles à réaliser. Pour déterminer ces deux flux, il est essentiel de connaître les moments où les différents éléments entrent en jeu. Les coûts d'investissement sont généralement encourus avant la date d'ouverture, tandis que les coûts de fonctionnement (par exemple, le personnel et les ressources pour l'exploitation et la maintenance) et les bénéfices pour l'utilisateur interviennent après l'année d'ouverture. Les bénéfices pour les utilisateurs, les coûts et les recettes d'exploitation peuvent être estimés à partir d'une modélisation sur deux ans ou plus, et le flux de bénéfices peut être calculé par interpolation et extrapolation entre les bénéfices pour les années modélisées ;

Le ratio bénéfices/coûts (BCR) est le rapport entre la somme actualisée de tous les coûts et bénéfices futurs. Le BCR est donc une mesure de la valeur de l'argent, qui indique le bénéfice social net pouvant être obtenu en contrepartie de chaque unité d'investissement. Bien que les valeurs soient monétisées, c'est-à-dire converties en unités monétaires dans cette approche, elles ne représentent pas nécessairement des investissements financiers (par exemple, le coût fictif monétaire du carbone n'est pas une somme d'argent payée. Cette notion représente un coût monétaire pour restaurer les effets liés à l'équivalent quantifié de dioxyde de carbone potentiellement émis). Les formules pour la VAN et le BCR se trouvent dans les manuels d'ACB, dont un bon exemple est celui de Pearce et Nash (1981) ;

Le taux de rendement interne (TRI). Alors que les mesures de VAN et de BCR nécessitent la spécification d'un taux d'actualisation de test, le TRI indique le taux de rendement moyen des coûts d'investissement sur la période d'évaluation. Ce taux peut être comparé au taux d'actualisation de test pour déterminer si le projet génère un rendement supérieur ou inférieur à celui qui est nécessaire pour atteindre le seuil de rentabilité en termes sociaux. Le calcul du TRI et les questions qui s'y rapportent sont abordés dans le chapitre 4 de Pearce et Nash et dans les autres manuels sur le ratio coûts-bénéfices.

#### **4.6. Limites**

Les installations d'accélérateurs de particules se caractérisent par un ensemble varié de coûts d'investissement et d'exploitation, de facteurs externes négatifs, de bénéfices et de facteurs externes positifs. Les infrastructures de recherche dédiées à la science fondamentale ne génèrent généralement pas de revenus financiers. Contrairement aux entreprises commerciales, les installations de recherche qui explorent des questions fondamentales sur la nature (comme l'origine de la matière ou la structure de l'univers) ne vendent pas de produits ou de services qui génèrent des revenus. Par conséquent, elles ne peuvent pas générer de bénéfices. Il est donc difficile d'évaluer leurs performances à l'aide de mesures commerciales standard telles que le retour sur investissement, les revenus ou les bénéfices d'exploitation.

Cette situation complique l'évaluation globale des projets et l'appréciation de leur viabilité à long terme si l'on

utilise les mesures financières traditionnelles. En l'absence de rendement financier positif direct par définition, la valeur de ces projets se reflète principalement dans leur impact socio-économique élargi. L'évaluation de ces infrastructures repose donc sur l'identification et, si possible, la quantification des bénéfices sociétaux par rapport aux coûts et aux facteurs externes associés.

La valeur du bien public fait référence à l'importance ou au bénéfice d'un bien public fourni sans profit à tous les membres d'une société. Une infrastructure scientifique telle qu'un collisionneur de particules est un exemple de bien public. L'élucidation de sa valeur telle qu'elle est perçue par le public est un élément complémentaire essentiel pour comprendre si la société considère qu'il vaille la peine d'investir dans une telle activité de recherche scientifique. La valeur totale du bien public dans les pays qui pourraient contribuer financièrement à une future infrastructure de recherche basée sur un collisionneur de particules s'est révélée plus importante que la somme de tous les coûts connus, identifiés et quantifiés. Ce résultat soutient l'intention, au moins d'un point de vue sociétal. L'hypothèse selon laquelle seuls les États membres du CERN contribuent à la mise en œuvre du projet n'est pas un scénario probable. Une infrastructure de l'ampleur du FCC attirera la participation et le financement d'autres pays que ceux de l'espace européen de la recherche, comme ce fut le cas pour le Grand collisionneur de hadrons. Par conséquent, pour estimer la valeur du bien public, une sélection a été faite des pays qui, historiquement, ont participé financièrement aux programmes de recherche internationaux du CERN. Il est possible d'élaborer un scénario extrêmement prudent qui n'inclut que les membres du CERN et les États membres associés. Il convient, cependant, de prendre en considération, a minima, l'ensemble de ces pays.

Comme le recommandent l'OCDE [220,221], le gouvernement français [222], le gouvernement britannique [223], et la Commission européenne [143,224], une évaluation complète de la durabilité devrait prendre en compte tous les éléments susmentionnés, c'est-à-dire les coûts totaux, les bénéfices totaux, les facteurs externes négatifs, l'impact positif et les bénéfices potentiels pour l'environnement. Dans la pratique, tous les éléments contributifs ne sont pas pertinents pour un projet d'investissement spécifique, tous les éléments ne peuvent pas être quantifiés de manière fiable et tous les éléments ne sont pas connus ou compris (Fig. 4.6). Les éléments de coûts et de bénéfices sont tous deux affectés d'incertitudes (Fig. 4.7). Les résultats présentés dans ce chapitre doivent être interprétés dans cette optique. Une analyse d'incertitude permettra éventuellement d'éclaircir les plages d'incertitude. Le guide d'ABC de la CE [108] recommande une approche basée sur la méthode de Monte Carlo. Cependant, cette méthode repose également sur la connaissance des distributions de probabilité des composantes individuelles de coûts et de bénéfices, qui sont à leur tour difficiles à obtenir avec un degré de confiance élevé.

Dans la mesure du possible, le rapport d'étude socio-économique approfondi décrit le champ d'application de l'étude de la manière la plus précise possible et les aspects pris en compte sont décrits avec les hypothèses utilisées pour la quantification des aspects et leur conversion en termes monétaires.

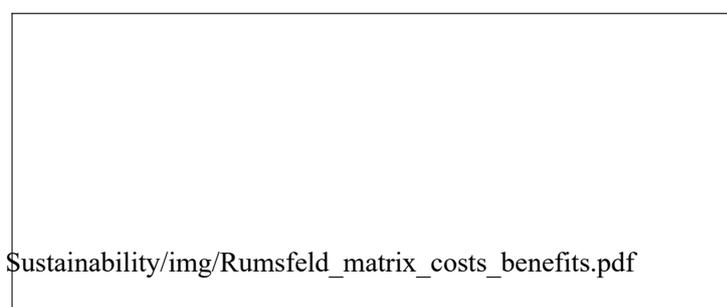


Fig. 4.6 : Matrice de Rumsfeld [225] appliquée à l'identification des coûts et des bénéfices des infrastructures de recherche.

La rationalisation de l'évaluation complète de la durabilité à l'aide d'une analyse standard des coûts et des bénéfices [226] permet d'identifier les aspects limitants et favorisant la durabilité et peut guider la conception et l'évolution itérative de l'infrastructure de recherche afin d'accroître la durabilité à long terme. Dans cette approche, le temps est pris en compte de manière rigoureuse, ce qui est essentiel lorsque l'on considère les effets sur l'environnement dans son ensemble. Alors que les méthodes permettant de quantifier les éléments de coût, y compris les facteurs externes négatifs, sont généralement bien définies dans les lignes directrices existantes, les approches permettant de quantifier et de valoriser les bénéfices et les facteurs externes positifs ne sont pas prises en compte de manière exhaustive dans un catalogue ou une taxonomie de portée générale. Ils sont spécifiques à chaque projet et doivent être identifiés et appréhendés au cas par cas, en faisant appel à différents types de méthodes et de modèles. Cependant, tous les éléments de coût et les facteurs externes négatifs ne sont pas connus à tout moment et, même s'ils le sont, ils ne peuvent pas toujours être quantifiés, valorisés et attribués de manière fiable avec des plages d'incertitude définies. Beaucoup de choses dépendent de l'évolution de l'économie et de la société, comme l'offre et la demande de dépôts de matériaux excavés, l'évaluation des impacts climatiques, l'évolution de l'alimentation en eau et de sa gestion à long terme, et la demande locale et régionale de biens et de services. Une analyse a priori n'est donc valable que dans le contexte actuel, en projetant tous les coûts et bénéfices potentiels futurs dans l'environnement socio-économique d'aujourd'hui, en utilisant les incertitudes actuellement connues. Toutes les hypothèses qui sous-tendent la quantification des coûts et des bénéfices, les modèles utilisés et les méthodes de valorisation doivent être documentés, de même que les résultats d'analyse.

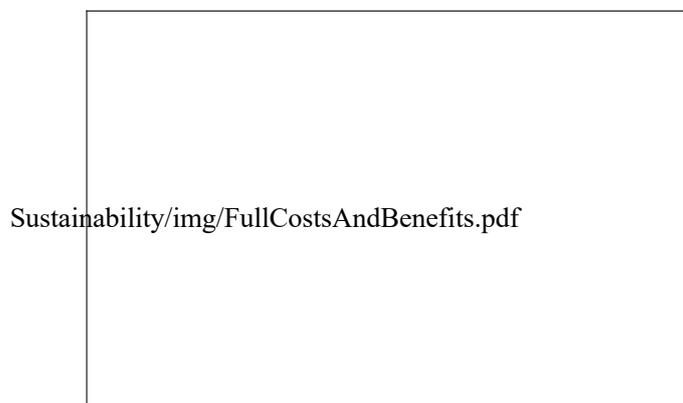


Fig. 4.7 : Exemples de prise en compte de l'ensemble des coûts et des bénéfices dans le cadre d'une analyse intégrée de la durabilité. Seuls les éléments de coûts et de bénéfices identifiés qui peuvent être convertis en termes monétaires ont été pris en compte dans cette évaluation spécifique. La couverture exhaustive de tous les facteurs externes négatifs et positifs est difficile et doit être acceptée dans toutes les évaluations d'impact socio-économique.

La durabilité peut se référer étroitement à la durabilité interne du projet. En réalité, il s'agit plus largement de toute une série de facteurs économiques, sociaux ou environnementaux externes qui peuvent être influencés par le projet. Les 17 objectifs de développement de haut niveau (avec plus de 160 sous-objectifs) parmi les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies de 2015 (voir Fig. 4.8 illustrent l'ampleur de ces facteurs. L'objectif final est d'identifier et de documenter les impacts positifs et négatifs quantifiés, en considérant les objectifs de développement durable des Nations Unies comme principe directeur pour les différents sujets [227] et en les prenant pour matrice de référence. Étant donné que l'analyse quantitative de la durabilité ne peut pas fournir une couverture complète, les ODD des Nations Unies peuvent être considérés comme un catalogue complémentaire d'impacts négatifs et positifs potentiels qui peuvent être examinés en termes de relation de cause à effet avec le projet. Les indicateurs mondiaux et le cadre de suivi des ODD [228] ont été conçus pour aider les pays, et non les organismes de recherche, à élaborer des stratégies [229]. Ils ne sont donc pas directement utilisables pour les rapports sur les programmes et projets scientifiques. Une infrastructure de recherche peut, toutefois, rendre compte des impacts positifs et négatifs pertinents en termes quantitatifs, dans la mesure où ils ont été évalués pour chaque activité liée aux objectifs des Nations Unies. Cette approche a, par exemple, été mise en œuvre dans le rapport environnemental périodique du CERN, qui

s'appuie sur le cadre des normes GRI [230]. En l'absence de lignes directrices établies, le SDG Tracker [231] et le site d'information de la Commission européenne sur les ODD [232] constituent un bon point de départ pour les recommandations d'indicateurs basées sur la spécification des objectifs ODD de l'ONU. La contribution du FCC aux objectifs de développement durable des Nations Unies n'a pas encore fait l'objet d'un examen approfondi. Il faudra, néanmoins, traiter cet aspect au cours de la phase de conception ultérieure qui comprend la phase d'autorisation du projet.

Une telle analyse qualitative n'est pas censée apporter la preuve du respect d'objectifs nationaux ou internationaux spécifiques. L'objectif est plutôt de montrer comment l'infrastructure de recherche affecte l'environnement de manière négative dans son ensemble et comment elle contribue de manière très tangible à chacun des objectifs.

Le choix du taux d'actualisation social (TAS) influe sur l'intégration des éléments de coûts et de bénéfices. L'utilisation de différents taux de TAS peut servir à effectuer une analyse de sensibilité et à montrer la robustesse de la valeur actuelle nette globale. Pour cette étude, une seule valeur de TAS a été utilisée.

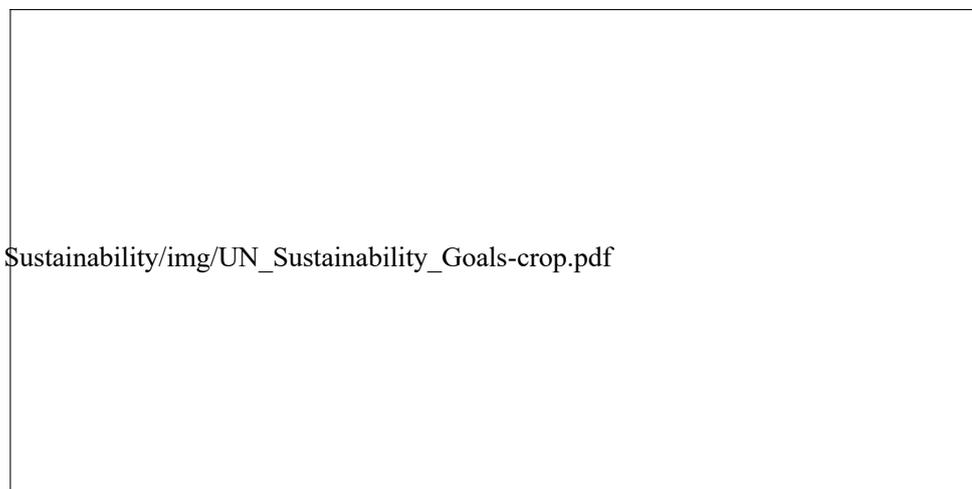


Fig. 4.8 : Les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

## 4.7. Analyse du cycle de vie

### 4.7.1. Contexte

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est devenue une priorité absolue à mesure que la lutte contre le changement climatique s'intensifie au niveau mondial. Les infrastructures couvrant les transports, la construction et les instruments scientifiques jouent un rôle essentiel dans cette transition. L'analyse du cycle de vie est un outil essentiel pour analyser les sources d'émissions qui affectent le climat, pour comprendre les causes et pour optimiser le projet en vue d'une meilleure compatibilité environnementale.

Le sujet est vaste et complexe, caractérisé par de nombreuses incertitudes et par le fait que les différents segments du projet ne sont connus que progressivement, au fur et à mesure de l'avancement du développement du concept et de la mise au point. Un projet à long terme comme le futur collisionneur circulaire ne fournit les plans détaillés des infrastructures techniques et des composants de l'accélérateur de particules que peu de temps avant la passation des marchés. Les détecteurs qui constituent les expériences scientifiques ne seront construits et achetés dans le cadre d'un effort de collaboration qu'à un stade beaucoup plus avancé. Pour pouvoir tirer parti des progrès techniques, les plans détaillés ne seront élaborés que lorsque l'équipement du collisionneur de particules sera bien connu, acheté et éventuellement déjà installé.

En plus de cette dépendance temporelle, l'ACV et l'évaluation du bilan carbone qui y est associée dépendent fortement du scénario d'approvisionnement et du scénario des technologies spécifiques. C'est pourquoi l'étude du FCC a pris le parti de se concentrer d'abord sur le segment de projet le mieux connu, à savoir l'empreinte environnementale du génie civil sur la base du concept actuel.

L'étude comprenait également l'estimation de l'empreinte scope 2 pour l'exploitation, c'est-à-dire les émissions de carbone associées à la consommation d'énergie. En outre, une hypothèse spécifique de passation de marché a dû être prise en compte pour cette analyse.

Il faut comprendre que les résultats présentés ici sont susceptibles d'évoluer tout au long des phases du cycle de vie du projet, si la décision de le poursuivre est prise. En particulier, ils ne tiennent pas compte de certains facteurs externes négatifs liés à la construction des accélérateurs de particules, ni d'expériences et d'optimisations rendues possibles par l'utilisation de technologies, de matériaux et de produits plus avancés, par la production locale, un approvisionnement responsable et les résultats des négociations commerciales au cours des processus d'approvisionnement. Par conséquent, un suivi continu des performances socio-économiques, intégrant une éco-conception basée sur un cycle itératif Planifier-Faire-Vérifier-Agir, est important et devra être mis en place avant d'entrer dans une phase préparatoire de projet.

L'analyse réalisée à l'aide des normes européennes d'ACV ISO/EN 14040 et ISO/EN 14044 visait à estimer le bilan carbone de la construction de l'infrastructure au service de deux collisionneurs de particules installés ultérieurement. Cette analyse vise à établir une référence crédible, en s'appuyant sur l'utilisation des déclarations environnementales de produits (EPD) normalisées selon la norme européenne EN 15804+A2 et la norme française FDES, pour les matériaux et les produits disponibles actuellement. Cette approche garantit une évaluation complète conforme à la norme européenne EN 17472, qui établit des exigences et des lignes directrices pour le calcul et la déclaration des émissions de GES associées aux projets d'infrastructure. Les travaux ont également porté sur les recommandations du Cerema pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers, sur les bases de données suisses « Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics » (KBOB) et françaises « La base de données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE2020 » (INIES) pour les empreintes écologiques des produits, et la base de données ecoinvent (ecoinvent est une organisation internationale dont la mission est de soutenir les évaluations environnementales de haute qualité et ayant un fondement scientifique) pour les produits et matériaux pour lesquels aucune EPD n'était disponible. Le travail a révélé quelques pistes réalistes pour réduire davantage les conséquences de la construction et a donné quelques recommandations sur les aspects futurs qui devront être pris en compte au cours de la phase de conception ultérieure.

Les résultats sont intégrés dans l'étude d'impact socio-économique plus large en convertissant les résultats de l'ACV en termes monétaires via l'approche recommandée par la BEI et les normes européennes EN 14007 et EN 14008.

#### **4.7.2. Méthodologie**

Le travail d'estimation du potentiel de réchauffement dû à l'effet de serre lié à la construction a comporté les étapes suivantes :

1. Identification des composants : établissement d'un inventaire détaillé des matériaux sur la base du devis quantitatif pour la construction souterraine, les 4 sites d'expérience et les sites techniques. Le projet conceptuel actuel a été pris en compte pour cette étape. Les produits choisis sont utilisés tout au long du cycle de vie de l'infrastructure.
2. Acquisition d'EPD : l'obtention d'EPD pour chaque matériau identifié, garantissant la conformité, par rapport à la norme EN 15804+A2, qui constitue la base de la norme EN 17472. Les matériaux sont sélectionnés sur la base d'une connaissance approfondie de l'environnement local et de la disponibilité des produits. Les solutions mises en œuvre sont donc des solutions de pointe.
3. Outil logiciel : sélection d'un outil certifié compatible avec les déclarations environnementales de produits françaises et suisses (One Click LCA®), garantissant des calculs robustes et précis.
4. Saisie des données : importation des données dans l'outil et saisie des données spécifiques au projet, y compris les quantités de matériaux et les phases du cycle de vie, le transport des matériaux excavés et

des matériaux de construction.

5. Calculs : L'outil a été utilisé pour estimer le budget carbone, en s'appuyant sur les données des EPD pour évaluer les émissions de GES pour chaque phase du cycle de vie.
6. Analyse des résultats : analyse des résultats pour identifier les principales sources d'émission, en les comparant à des points de référence et à des objectifs de réduction.
7. Formulation de recommandations : sur la base des résultats et de l'identification des principaux facteurs d'impact, une série de recommandations a été formulée, qui doit être prise en considération dans la phase de conception suivante afin de réduire davantage l'empreinte environnementale de la construction.

Les étapes suivantes ont été suivies pour l'estimation des émissions Scope 2 :

1. Identification de la consommation : estimation de la consommation d'électricité pour la charge de base et pour chaque phase opérationnelle, et établissement d'un calendrier opérationnel ;
2. Hypothèse d'approvisionnement : élaboration d'un scénario crédible pour l'approvisionnement en énergie sur la base d'une consultation d'experts externes, l'accent étant mis sur l'approvisionnement en énergie à partir de sources d'énergie renouvelables ;
3. Quantification : quantification de l'effet climatique associé en utilisant la base de données française accréditée de l'ADEME (l'Agence de la Transition Écologique. Il s'agit d'une agence publique française placée sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) ;
4. Formulation de recommandations : sur la base des résultats et de l'identification des principaux facteurs d'impact, une série de recommandations a été formulée, qui doit être prise en considération dans la phase de conception ultérieure afin de réduire davantage l'empreinte environnementale de l'exploitation.

Dans les deux cas, les résultats ont été convertis en termes monétaires en utilisant le prix fictif du carbone établi par la BEI. Les résultats ont été intégrés dans le temps et actualisés à l'aide d'un taux d'actualisation sociale fixé à 2,8 % pour le projet d'évaluation.

### 4.7.3. Résultats

#### Phase de construction

L'ACV [60] a donné la répartition des émissions de GES entre les différentes phases du cycle de vie et les différents matériaux. Il faut souligner que les résultats ont été obtenus avec les produits et matériaux les plus avancés et les plus modernes du marché. Les résultats sont donc crédibles et l'empreinte climatique liée au carbone peut encore être réduite grâce à l'intégration de technologies plus avancées dans le projet. Les principales sources d'émissions sont l'acier armé (14 %), le béton préfabriqué (49 %) et le béton (23 %). Les effets climatiques dus à l'utilisation de l'électricité ont été inclus dans cette analyse. On suppose que l'électricité nécessaire à l'ensemble du processus de construction peut être obtenue à partir de sources d'énergie renouvelables via des fournisseurs locaux en France et en Suisse. Les empreintes carbone officielles de la combinaison actuelle d'énergies renouvelables dans les deux pays hôtes ont été utilisées dans l'étude (voir Tableau 3.5). Les résultats obtenus mettent en évidence les possibilités de réduction des émissions via l'établissement des exigences techniques pour l'infrastructure, la prise en compte de la réduction du carbone, la sélection rigoureuse des matériaux qui répondent aux exigences, l'optimisation du processus de construction et grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les impacts sur les GES du scénario initial et du scénario de référence sont présentés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Résumé du bilan carbone du processus de construction basé sur l'ACV.

<b>Item</b>	<b>Footprint</b>
Subsurface	477 390 tCO <sub>2</sub> (eq)
4 technical sites	17 546 tCO <sub>2</sub> (eq)
4 experiment sites	31 735 tCO <sub>2</sub> (eq)
<b>Total</b>	<b>526 671 tCO<sub>2</sub>(eq)</b>

La valeur obtenue correspond approximativement à trois années du budget carbone annuel du CERN [79] ou à un tiers du budget carbone des Jeux olympiques de Paris en 2024 [80].

D'autres indicateurs de performance environnementale obtenus grâce à l'ACV sont présentés dans le Tableau 4.2. Par rapport aux processus de construction classiques, qui ne sont pas bas carbone, l'indicateur le plus pertinent est l'eutrophisation marine, qui peut être liée à l'utilisation d'acier recyclé.

Les résultats permettent également de comparer la construction de structures souterraines avec des structures conventionnelles, comme, par exemple les tunnels routiers, les tunnels de métro et les lignes de tramway. Ces dernières constructions se caractérisent par une empreinte carbone nettement plus élevée en raison des exigences beaucoup plus strictes imposées par l'utilisation publique. À titre de comparaison, la construction de la ligne de métro U5 à Berlin (Allemagne), ligne de métro type à petit gabarit, a une empreinte carbone de 80 000 tCO<sub>2</sub> (éq) par km. L'empreinte d'une ligne de tramway type représente entre 7 600 et 10 850 tonnes de CO<sub>2</sub> (éq) par kilomètre. La partie linéaire des structures souterraines d'un futur collisionneur circulaire a une empreinte carbone d'environ 5 300 tCO<sub>2</sub> (éq) par km (voir Fig. 4.9).

Tableau 4.2 : Résumé d'autres indicateurs de l'ACV.

<b>Indicator</b>	<b>Value</b>
Potential contribution to ozone layer depletion	19.3 kg CFC 11 eq
Potential acidification	929 t SO <sub>2</sub> eq
Potential eutrophication - fresh water	96 t (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup>
Potential eutrophication - marine	12 t N
Potential eutrophication - land	2.1 x 10 <sup>6</sup> mol N

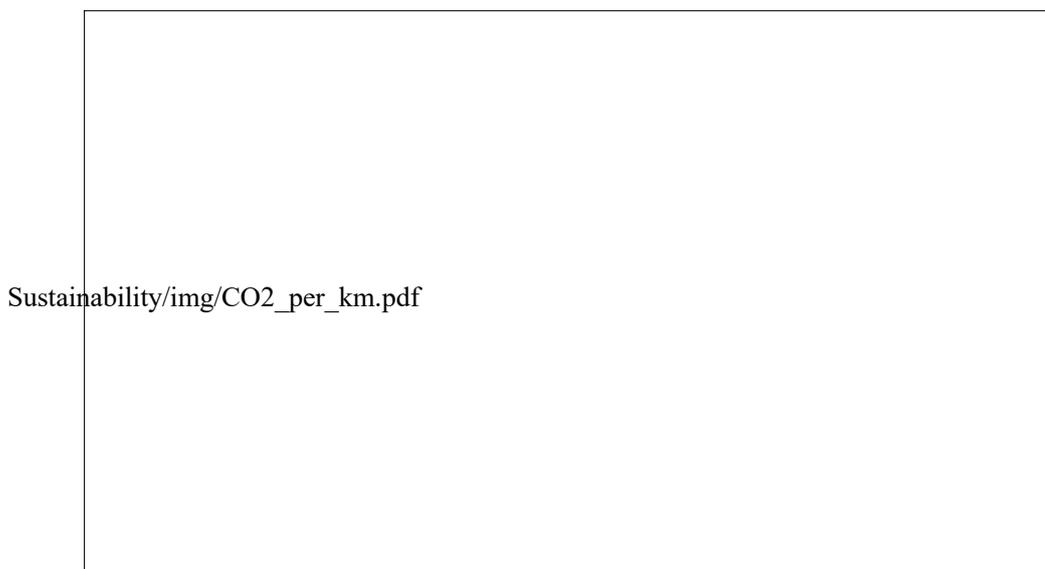


Fig. 4.9 : Comparaison de l’empreinte carbone entre une petite ligne de métro souterrain, une ligne de tramway et le FCC. [60]

Sur la base de ces résultats, les leviers suivants ont été identifiés pour réduire les émissions de GES :

- Documenter les exigences techniques pour les éléments structuraux de surface et souterrains qui correspondent au strict minimum nécessaire pour mener à bien le programme de recherche scientifique ;
- Élaborer une éco-conception qui réponde aux exigences établies en gardant à l’esprit la réduction des émissions de carbone ;
- Apporter des modifications structurales en réduisant l’épaisseur des revêtements intérieurs des structures souterraines de 5 cm, ce qui entraînera une réduction de 16 % de la quantité de béton préfabriqué et d’acier d’armature ;
- Remplacer les matériaux par des matériaux à faible impact dans la mesure du possible, ce qui permet une réduction supplémentaire des émissions de GES ;
- Optimiser le processus de construction pour réduire au maximum les émissions, y compris l’approvisionnement local en matières premières et matériaux recyclés, et la production de matériaux de construction ;
- Des processus de construction et des transports entièrement électrifiés ;
- Réutiliser les matériaux excavés, par exemple dans la production de béton.

### *Effets sur le climat dus à la consommation d'énergie pendant le fonctionnement*

Pour estimer les effets sur le climat liés à la consommation d'énergie (scope 2) pendant la phase d'exploitation, les besoins en électricité ont été estimés pour la charge de base et pour chaque phase d'exploitation (Z, WW, ZH, tt). Pendant la phase d'exploitation, l'énergie nécessaire pour alimenter les infrastructures, les accélérateurs de particules et les expériences proviendra entièrement du réseau électrique français, géré par le gestionnaire du réseau national RTE. Un portefeuille de plusieurs contrats d'électricité et contrats d'achat d'électricité (CAE) facilite la diversification des sources d'électricité et l'approvisionnement auprès de différents opérateurs pouvant fournir des certificats d'origine, ce qui permet d'établir des rapports sur l'empreinte carbone basés sur le marché. Une étude préparatoire réalisée par deux consultants externes indépendants a montré qu'à court terme, avant 2030, 60 % de l'énergie nécessaire pourrait déjà être obtenue à partir de sources d'énergie renouvelables et que dans un délai de 15 ans (vers 2040), un portefeuille permettant de couvrir 80 % des besoins avec des énergies renouvelables pourrait être mis en place. Pour 2050, date à laquelle il est envisagé de faire fonctionner le FCC, on envisage une couverture de 90 % avec un approvisionnement résiduel de 10 % d'énergie nucléaire. Pour l'évaluation des performances socio-économiques, il a été tenu compte d'une utilisation maximale prudente de 80 % d'énergie provenant de sources renouvelables, ce qui entraîne une surestimation de l'empreinte en équivalent carbone. Pour estimer l'intensité carbone du scénario du projet, les valeurs officielles de l'Agence nationale française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ont été utilisées, conduisant à un mélange avec une intensité carbone d'environ 15 tCO<sub>2</sub> (ég) par GWh. Pour les calculs de l'évaluation des performances socio-économiques, on a utilisé une intensité de carbone dégressive plus prudente commençant par 26 tCO<sub>2</sub> (ég) par GWh en 2024, 19,10 en 2046 et 18,41 en 2050 en supposant une diminution constante du facteur d'émission de 4 %. Là encore, cette approche conduit à une surestimation de l'empreinte de l'équivalent carbone. Le Tableau 4.3 ci-dessous donne l'indication scope 2 du budget carbone pour chaque phase d'exploitation du collisionneur de particules avec faisceau pour la recherche scientifique et l'empreinte totale pour toutes les phases d'exploitation et d'arrêt pour deux hypothèses différentes d'empreinte carbone conduisant à la fourchette suivante pour l'empreinte carbone prévisible : de 15 tCO<sub>2</sub> (ég) par GWh à 25 tCO<sub>2</sub> (ég) par GWh.

Tableau 4.3 : Résumé de l'empreinte des émissions de carbone Scope 2 liées à l'exploitation, en utilisant deux hypothèses différentes d'intensité de carbone basées sur le marché pour l'électricité achetée. Il convient de noter que l'empreinte carbone intégrale couvre également les émissions Scope 2 pendant les périodes d'arrêt.

<b>Phase</b>	<b>Duration</b>	<b>GWh/year</b>	<b>Footprint all years at 15 tCO<sub>2</sub>(eq)/GWh</b>	<b>Footprint all years at 25 tCO<sub>2</sub>(eq)/GWh</b>
Z	4 years	1 100	66 000 tCO <sub>2</sub> (eq)	110 000 tCO <sub>2</sub> (eq)
WW	2 years	1 300	39 000 tCO <sub>2</sub> (eq)	65 000 tCO <sub>2</sub> (eq)
HZ	3 years	1 500	67 500 tCO <sub>2</sub> (eq)	112 500 tCO <sub>2</sub> (eq)
t̄t̄	5 years	1 770	132 750 tCO <sub>2</sub> (eq)	221 250 tCO <sub>2</sub> (eq)
<b>Total</b>		<b>20 350</b>	<b>305 250 tCO<sub>2</sub>(eq)</b>	<b>508 750 tCO<sub>2</sub>(eq)</b>

L'intégration des exigences en matière de consommation d'énergie au cours des années d'exploitation conduit à un budget carbone intégral qui correspond à environ 2,5 années de l'empreinte carbone annuelle actuelle du CERN. À titre de comparaison, la société Meta, connue pour ses produits Facebook, Instagram et WhatsApp, exploite actuellement au moins trois centres de données aux États-Unis dont la consommation d'électricité est comprise entre 1,2 et 1,4 TWh par an [233]. Leurs émissions Scope 2 individuelles et localisées sont nettement supérieures à 350 000 tCO<sub>2</sub> (ég) par an.

## Coût fictif du carbone

La conversion du budget carbone respecte les objectifs globaux de protection du climat et les limites de température qui ont été approuvés par un ensemble de pays lors de la signature de l'Accord de Paris. La Banque européenne d'investissement (BEI) a calculé un « prix fictif du carbone » qui représente les coûts que l'humanité doit associer aux mesures de protection du climat pour atteindre l'objectif convenu. Le prix fictif du carbone augmente au fil des ans, rendant une tonne de CO<sub>2</sub> (éq) de plus en plus chère chaque année pour la société. La valeur actualisée de la conversion monétaire de l'empreinte carbone liée à la construction et à l'exploitation est d'environ 342 millions d'euros. Ce montant est ajouté dans l'évaluation socio-économique intégrée du côté des coûts et sert à estimer la valeur actuelle nette de la future infrastructure de recherche à la fin de son programme d'exploitation scientifique. Le Tableau 4.4 présente le coût fictif du carbone actuellement recommandé pour l'évaluation des projets par la Banque européenne d'investissement (BEI) et sa valeur ajustée dans le temps qui sera utilisée en 2025.

Tableau 4.4 : Coût fictif du carbone en unités monétaires par tonne de CO<sub>2</sub>(eq) pour différentes juridictions. Les taux de la première ligne sont également publiés en tant que loi de l'Union européenne 2021/C 280/01. Il convient de noter que le taux d'actualisation de Ramsey de 1,5 % à court terme est appliqué aux taux américains indiqués.

Organisation	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2060	Source
EIB and EU	Euro 2016	€80	€165	€250	€390	€525	€660	€800	n/a	[234]
EIB and EU	Euro 2024 <sup>†</sup>	n/a	€208	€316	€492	€663	€833	€1010	n/a	
SGPI France	Euro 2018	€87	n/a	€250	n/a	€500	n/a	€775	€1203	[150]
UBA Germany	Euro 2023	€240	n/a	€254	€253	n/a	n/a	€301	n/a	[235]
UK (high)	GBP 2020	£361	£390	£420	£453	£489	£527	£568	n/a	[236]
EPA USA	USD 2020	\$340	n/a	\$380	n/a	\$430	n/a	\$480	\$530	[237]

<sup>†</sup> Adjusted based on EU-27 GDP deflator 100.0 in 2016 and 126.3 in 2023. It measures the amount to which the real value of an economy's total output is reduced by inflation.

## 4.8. Performances socio-économiques

### 4.8.1. Contexte

L'objectif de l'analyse complète de l'impact socio-économique, qui inclut un ensemble plus large de composantes telles que les facteurs externes environnementaux, est de mieux comprendre les facteurs de coût et les bénéfices potentiels. Cette approche a été adoptée pour planifier un scénario durable. L'analyse peut également révéler les conditions dans lesquelles les performances socio-économiques globales peuvent être positives, c'est-à-dire peuvent représenter pour la société un investissement durable à long terme. La réalisation d'une telle analyse dès le départ permet au projet d'intégrer les résultats dans la phase de conception ultérieure, lors de laquelle il est plus facile de prévoir les facteurs de durabilité que pendant la construction ou lorsque l'infrastructure est déjà en service.

L'analyse socio-économique repose sur une hypothèse de travail concernant les investissements et les ressources engagés dans le projet par une collaboration internationale. Par conséquent, le travail est basé sur une estimation du coût total du projet effectué en 2024, comprenant tous les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et les facteurs externes négatifs et positifs pertinents pour l'ensemble de la période d'observation. Cette estimation peut différer des estimations du coût du projet réalisé ultérieurement ou présentées ailleurs, car elle représente une situation instantanée des estimations réalisées en juin 2024 et inclut les mobilisations de personnel au niveau mondial, dont le personnel impliqué dans les collaborations internationales, ainsi que les facteurs externes environnementaux négatifs valorisés. Les coûts totaux requis pour l'analyse socio-économique comprennent les coûts d'investissement (dépenses d'investissement et d'exploitation), ainsi que les facteurs externes valorisés tels que les coûts environnementaux et le coût fictif du carbone. Par conséquent, ces chiffres ne doivent pas être utilisés pour déterminer les besoins financiers nécessaires à la mise en œuvre du projet. Ils représentent le coût total des missions scientifiques pour la société pendant toute la période d'observation. Il en va de même pour les bénéfices mentionnés : ces derniers représentent un ensemble d'effets positifs identifiés, quantifiés et valorisés pour la société et ne se limitent pas aux effets économiques directs. Ni les coûts ni les bénéfices ne peuvent être couverts de manière exhaustive

en raison des incertitudes, des ressources disponibles et du temps limité. Toutefois, les résultats présentés ici sont suffisamment complets et détaillés pour établir un ratio coûts-bénéfices stable, qui ne risque pas de diminuer davantage avec l'introduction de coûts supplémentaires mineurs et de facteurs externes négatifs. Les performances socio-économiques nécessitent des mises à jour périodiques au fur et à mesure que le projet est défini de manière plus précise et plus détaillée et à mesure de la disponibilité croissante des modèles et ressources permettant d'estimer les bénéfices supplémentaires.

Un rapport complet sur l'analyse des performances socio-économiques [122] détaille les données, les hypothèses, les méthodologies et les résultats de la première analyse d'impact socio-économique pour la première phase du programme de recherche intégré du FCC : le collisionneur de leptons FCC-ee basé seulement sur deux points d'interaction. L'analyse couvre l'ensemble du cycle de vie du FCC-ee, à savoir sa conception, la construction des structures de surface et souterraines, la création des infrastructures techniques, la construction de l'accélérateur de particules et du détecteur d'expérience, l'exploitation et les phases de mise à niveau progressive de l'énergie des faisceaux. L'ensemble de l'analyse porte sur une durée de 41 ans (de 2024 à 2064), commençant par les dépenses de l'étude de préinvestissement, la décision d'investissement financier et se poursuivant jusqu'à la fin de la phase d'exploitation. L'approche méthodologique est basée sur les lignes directrices réglementaires établies par la Commission européenne (CE) [238], la Banque européenne d'investissement (BEI) [234], les lignes directrices du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [215] et le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) français [150]. Les lignes directrices adoptées sont compatibles avec celles d'autres pays de l'espace européen de la recherche, par exemple le Royaume-Uni [223]. L'étude prend également en compte la littérature la plus récente, les travaux et les résultats de la recherche empirique sur la quantification économique des impacts associés aux infrastructures de recherche.

Lors de l'évaluation du projet FCC-ee, les coûts et les bénéfices sont exprimés par rapport à un scénario dans lequel le projet n'est pas réalisé. Dans ce scénario contrefactuel, le LHC continuerait à fonctionner jusqu'à sa fin de vie prévue vers 2040 et aucun nouveau collisionneur de particules ne serait construit. Le CERN continuerait à exploiter les accélérateurs de particules existants (par exemple, AD, ELENA, LINAC4, PS) et les infrastructures expérimentales qui leur sont liées. Elle est basée sur les méthodes de l'analyse des coûts et des bénéfices (ACB) standard. Tous les coûts et bénéfices sont incrémentaux, c'est-à-dire qu'ils sont exprimés sous la forme d'une différence entre les coûts et bénéfices de l'exploitation de l'infrastructure existante après la fermeture du LHC et les coûts et bénéfices que le FCC-ee induirait. Par conséquent, l'approche considère le changement net, en se concentrant sur les effets en relation de causalité qui peuvent être attribués de manière fiable au projet FCC-ee.

Cette analyse des coûts et des bénéfices sociaux est fondée sur l'hypothèse d'un projet FCC-ee comportant quatre expériences, impliquant collectivement environ 260 000 années-personnes sur la durée de vie du projet. La mobilisation des personnes devrait atteindre un maximum d'environ 15 500 personnes pendant la phase d'exploitation (Fig. 4.10). Ce groupe diversifié comprend des scientifiques, des ingénieurs, des techniciens, du personnel administratif, des chercheurs en thèse et post-doctoraux, des étudiants de premier cycle, des étudiants en master et des apprentis. Sur l'ensemble des participants, environ 11 % sont supposés travailler sur les accélérateurs de particules et les infrastructures techniques, tandis que les 89 % restants s'occuperont des détecteurs et de physique expérimentale.

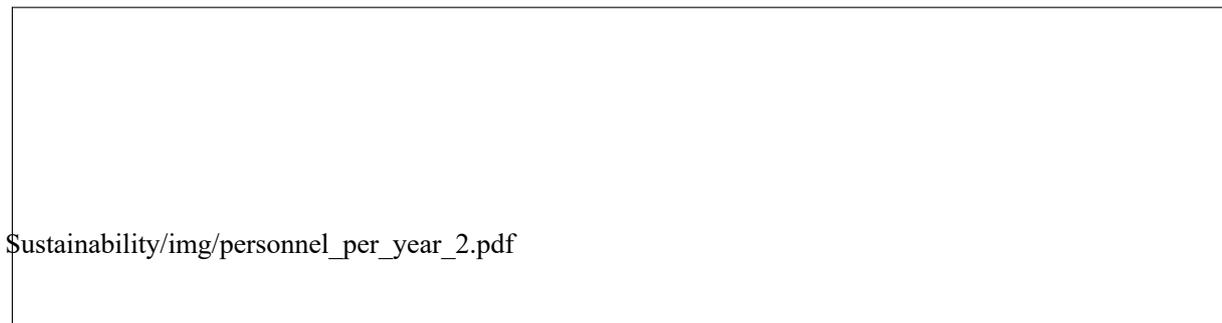


Fig. 4.10 : Nombre de personnes mobilisées dans le projet au fil des années et pendant toutes les phases du projet.

#### **4.8.2. Résultats**

L'évaluation initiale de l'impact socio-économique basée sur deux collaborations aux expériences, limitée aux coûts d'investissement, aux coûts d'exploitation et aux principales voies de bénéfices, a donné une valeur actuelle nette positive à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee [122]. L'évaluation complémentaire ultérieure réalisée en 2024 [239] a utilisé un calcul encore plus prudent basé sur une mise à jour de la configuration du projet. Elle n'a pris en compte qu'un ensemble réduit de voies de bénéfices bien justifiables et a étendu l'analyse à des effets plus larges et à des facteurs externes environnementaux négatifs :

- Coûts d'investissement et de fonctionnement révisés, reflétant l'évolution des prix des biens et services entre 2018 et 2024 ;
- Quatre collaborations aux expériences (au lieu des deux prévues dans l'évaluation initiale) ;
- Taux d'actualisation sociale révisé (2,8 %) ;
- Introduction de facteurs externes négatifs notables pour l'environnement ;
- Révision de la valorisation de la principale voie de bénéfices en tenant compte des données supplémentaires rassemblées ;
- Limitation stricte des bénéfices aux principales voies de bénéfices.

Tableau 4.5 : Évaluation des coûts et bénéfices sociaux du projet FCC-ee exprimés sous forme d'un bénéfice supplémentaire par rapport à un scénario contrefactuel dans lequel aucun projet de collisionneur n'est mis en œuvre après la fin de l'exploitation du HL-LHC. Les résultats de l'analyse socio-économique « élargie » comprennent des facteurs externes négatifs et des bénéfices environnementaux notables.

<b>Cost/Benefit</b>	<b>Undiscounted</b>	<b>Discounted</b>
<b>(A) Costs</b>		<b>19 666 MCHF</b>
Investment costs (for 4 experiments, injector and $t\bar{t}$ stage)	16 215 MCHF	10 171 MCHF
Personnel costs	16 802 MCHF	7 544 MCHF
Operation costs (materials, consumables, services)	4 410 MCHF	1 879 MCHF
Dismantling costs	228 MCHF	72 MCHF
<b>(B) Negative externalities</b>		<b>354 MCHF</b>
Shadow cost of carbon	634 MCHF	342 MCHF
Loss of agricultural income, biodiversity & habitat	7.6 MCHF	4.1 MCHF
Social cost of project-related, induced noise	0.02 MCHF	0.02 MCHF
Social cost of project-related, traffic-induced air pollution	0.9 MCHF	0.6 MCHF
Social cost of project-related, traffic-induced GHG externalities	9.8 MCHF	7 MCHF
Social cost of ionising radiation	1.3 MCHF	0.6 MCHF
<b>(C) Core benefits</b>		<b>23 974 MCHF</b>
Scientific production	6 507 MCHF	2 813 MCHF
Early career researcher training	20 687 MCHF	4 986 MCHF
Industrial benefits for suppliers	17 577 MCHF	9 569 MCHF
Onsite visitors	4 538 MCHF	2 129 MCHF
Online and social media	229 MCHF	102 MCHF
Open software (experiments and detectors)	7 428 MCHF	4 375 MCHF
<b>Total costs including negative externalities</b>	<b>(A + B)</b>	<b>20 020 MCHF</b>
<b>Total core benefits</b>	<b>(C)</b>	<b>23 974 MCHF</b>
<b>Reference net present value (NPV)</b>	<b>(C) - (A + B)</b>	<b>3 954 MCHF</b>
<b>Reference Benefit Cost Ratio (BCR)</b>		<b>1.20</b>

Tableau 4.6 : Potentiels de bénéfices supplémentaires non pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de référence et du ratio coûts-bénéfices.

<b>Cost/Benefit</b>	<b>Undiscounted</b>	<b>Discounted</b>
<b>(D) Residual asset value for a subsequent collider project</b>	- 7911 MCHF	- 2480 MCHF
<b>(E) Wider benefit potentials</b>		<b>6916 MCHF</b>
Open information platform	5053 MCHF	2681 MCHF
Open collaborative software	7516 MCHF	3487 MCHF
ICT spin-offs	832 MCHF	409 MCHF
Creation of renewable energy sources through contracts	227 MCHF	117 MCHF
Supply of waste heat	313 MCHF	132 MCHF
Avoided greenhouse gas emissions (GHG) by supply of waste heat	170 MCHF	74 MCHF
Rewilding (habitats and biodiversity)	0.4 MCHF	0.2 MCHF
Contributions to regional emergency services	31 MCHF	16 MCHF
<b>Net present value including residual asset value</b>	<b>(C) - (A + B + D)</b>	<b>6 446 MCHF</b>
<b>Total core and wider benefit potentials</b>	<b>(C+E)</b>	<b>30 890 MCHF</b>

Le Tableau 4.5 présente les résultats les plus sûrs et les plus stables de cette évaluation des coûts et bénéfices sociaux additionnels, en montrant les principales voies de coûts et de bénéfices. Un ensemble de voies de bénéfices plus larges est susceptible d'être obtenu, à condition que la planification et la mise en œuvre spécifiques soient intégrées aux phases de conception de projet et que les conditions contextuelles appropriées soient en place (voir Tableau 4.6). Pour agréger la valeur des bénéfices mesurés et les comparer aux coûts et aux facteurs externes négatifs, un taux d'actualisation social (TAS) a été établi spécifiquement pour le projet. Au lieu de s'appuyer sur les TAS existants proposés par les organisations internationales, ce taux spécifique au projet tient compte du niveau de développement et des préférences en matière de consommation et d'investissement des pays contribuant au budget du CERN, ainsi que de la très longue durée du projet. La valeur de TAS considérée par hypothèse est de 2,8 %. Le résultat, strictement limité aux coûts, aux facteurs externes négatifs notables et aux principaux bénéfices, présente une valeur actuelle nette positive d'environ 4 milliards de francs suisses pour le projet, ce qui conduit à un ratio bénéfices/coûts (BCR) d'environ 1,20. Cette valeur ne doit pas être interprétée comme un nombre fixe et certain. Un BCR positif dans le cadre d'hypothèses très prudentes permet d'avoir confiance dans le fait que le scénario du projet pourra apporter une contribution globalement bénéfique à la société. En fonction de la conception du projet et des mesures de mise en œuvre visant à favoriser la génération de bénéfices et à contrôler les coûts et les facteurs externes, le BCR peut être inférieur ou supérieur. Un suivi continu de l'impact généré tout au long des phases ultérieures du projet et un contrôle pendant la mise en œuvre et l'exploitation du projet sont nécessaires pour garantir une performance globale positive.

Les résultats des études menées sur une période d'environ sept ans suggèrent une performance socio-économique nette positive du projet FCC-ee. Ce résultat permet de démontrer la durabilité sociale à long terme de la nouvelle infrastructure de recherche scientifique proposée. L'analyse effectuée jusqu'à présent a permis d'identifier les principales voies d'impact, dans le but de soutenir la conception de l'infrastructure de recherche afin de générer un impact socio-économique durable. Les résultats présentés ici ne sont cependant pas exhaustifs. En ce qui concerne les coûts, les estimations sont susceptibles d'évoluer au cours de la phase de conception jusqu'à ce qu'une décision d'investissement soit prise à titre provisoire et sujette à des mises à jour. L'approche adoptée, consistant à intégrer l'analyse des impacts sur l'environnement, l'économie et la société dans son ensemble, est conforme à la pratique de l'UE en matière d'évaluation des impacts sur la politique et les infrastructures. Une analyse socio-économique complémentaire, avec davantage de temps et de ressources, permettrait de découvrir et de quantifier d'autres impacts positifs et de renforcer la solidité des bénéfices déjà estimés. Études de Flyvbjerg et al. [240–242] soulignent une tendance commune à la sous-estimation des coûts, à la surestimation des revenus et à la mauvaise évaluation des impacts

environnementaux et économiques, ainsi qu'à l'introduction involontaire de biais. La littérature soutient donc la réalisation d'une analyse d'incertitude, en particulier pour les projets d'infrastructure d'envergure. Pour y parvenir, le cadre déterministe existant de l'ACB peut être complété par un modèle probabiliste, couvrant les coûts et les bénéfices. Cette approche permettra d'avoir une vision plus complète des résultats prévisibles du projet.

#### **4.8.3. Couverture des coûts et des bénéfices**

L'évaluation socio-économique présentée a permis de bien couvrir les principales voies de coûts et de bénéfices, bien que la couverture exhaustive d'une vaste infrastructure de recherche soit limitée par les connaissances sur les voies d'impact, les modèles permettant de les quantifier, le temps, le personnel et le budget. L'évaluation réalisée comprend la totalité des coûts d'investissement nécessaires aux structures de génie civil, les injecteurs, le booster, le collisionneur jusqu'au stade tt et 4 détecteurs d'expérience. L'ensemble des frais de personnel comprenant le personnel rémunéré par le CERN et le personnel fourni par les collaborations internationales au programme a été pris en compte. Les coûts complets des matériaux, de la maintenance, des consommables et des services pour la phase d'exploitation ont été inclus dans les coûts. Enfin, les coûts de démantèlement du booster de l'anneau principal et du collisionneur ont également été inclus. Ce poste de coûts ne comprend pas l'élimination des équipements qui seront classés comme déchets radioactifs. Une telle estimation ne pourra être réalisée qu'une fois que les études techniques auront été achevées. Il n'est pas non plus tenu compte de la valeur marchande résiduelle des métaux, qui entraînerait une plus-value après démantèlement.

L'établissement d'une valeur résiduelle appropriée pour un investissement proposé est un élément clé pour l'analyse de la viabilité financière d'un tel projet. Selon le Guide méthodologique pour la réalisation de l'Analyse Coûts-Avantages des projets d'investissement de la Commission européenne, la valeur actualisée de tout revenu net futur après l'horizon temporel du projet doit être incluse dans la valeur résiduelle. Le guide indique qu'il « s'agit de la valeur actuelle à l'année  $n$  des revenus, nets des coûts d'exploitation, que le projet pourra générer grâce au potentiel de service restant des actifs immobilisés dont la durée de vie économique n'est pas encore complètement épuisée ». Conformément à cette ligne directrice de la CE (p. 45, [224]) que les économistes praticiens utilisent, la valeur résiduelle est mise en évidence en tant que valeur avec un signe négatif dans le décompte des coûts. S'il existe une « valeur d'usage » pour les actifs, la valeur résiduelle est supérieure à zéro. Dans le cas contraire, la valeur résiduelle est considérée comme nulle. Les deux scénarios ont été pris en compte dans l'analyse. Étant donné que l'infrastructure proposée peut desservir successivement deux collisionneurs de particules, la valeur résiduelle des actifs est prise en compte dans cette évaluation. En raison de la très longue durée du programme intégré, cette évaluation des coûts et des bénéfices sociaux ne concerne, cependant, que la première phase, celle du collisionneur de leptons FCC-ee. Une valeur d'actif résiduelle est calculée à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee et peut être mise à la disposition d'un éventuel projet ultérieur de collisionneur de hadrons (FCC-hh) à titre de « cadeau ». La valeur d'actif résiduelle devient nulle si aucun collisionneur de particules n'est installé ultérieurement pour tirer profit des actifs accumulés. Cette approche a également été adoptée pour l'évaluation des coûts et bénéfices sociaux du Grand collisionneur de hadrons [193]. Le calcul de la valeur actuelle nette (VAN) de référence pour le projet de collisionneur de leptons FCC-ee est effectué de manière très prudente : il n'inclut pas la valeur d'actif résiduelle à la fin de la période d'observation. Afin de montrer que d'autres impacts sociétaux sont possibles et qu'un programme intégré comprenant un collisionneur de leptons (FCC-ee) suivi d'un collisionneur de hadrons (FCC-hh) est préférable, ce bénéfice peut être inclus dans une VAN plus large.

La matérialisation des facteurs externes négatifs et des bénéfices dépend largement de la conception d'un cadre de création d'impact et des conditions externes.

Les facteurs externes négatifs tels que l'empreinte carbone et le coût fictif associé du carbone dépendent des mesures d'approvisionnement prises pour la construction, des accords d'achat d'électricité conclus pour la construction et l'exploitation, ainsi que de la tarification nationale du carbone au moment de la génération de l'empreinte carbone. Le coût fictif du carbone indiqué tient compte de la construction et de l'exploitation de l'infrastructure de recherche. Les coûts des accélérateurs et des détecteurs n'ont pas pu être inclus pour le moment, car ils dépendent de la disponibilité d'une conception technique et d'un scénario de passation de marché.

Les effets des perturbations potentielles telles que le bruit et le trafic liés à la construction dépendent de manière significative du nombre réel de personnes affectées. Par ailleurs, certains impacts sont difficiles à prévoir à ce stade précoce en raison d'un manque de modèles prédictifs pour certaines voies de bénéfices, parce qu'ils n'ont pas pu être identifiés, par manque de temps et de ressources ou simplement en raison de grandes incertitudes. Parmi les exemples, on peut citer les facteurs externes positifs élargis qui peuvent découler du développement de nouveaux produits et processus de réutilisation des matériaux excavés, de l'avancement des technologies pour les matériaux de construction à faible teneur en carbone, de la création de synergies locales avec les municipalités qui accueillent les sites de surface, de la création imprévue de retombées technologiques de grande valeur et de l'invention de technologies tout à fait nouvelles.

L'analyse s'est concentrée sur les bénéfices directs actuellement connus et prévisibles sur la base d'éléments factuels antérieurs, par exemple dans le cadre du projet LHC et du projet européen XFEL. Elle a été conclue dès qu'un niveau de confiance élevé a été atteint dans la démonstration d'un seuil de rentabilité entre les bénéfices et les coûts totaux, y compris les facteurs externes négatifs notables. Des hypothèses prudentes ont été retenues pour toutes les estimations. Lorsqu'une relation de cause à effet entre les effets positifs ou négatifs et le projet n'a pas pu être établie de manière fiable, l'élément a été entièrement omis. En ce qui concerne les éléments de coûts et de bénéfices pour lesquels des engagements restent à formuler (par exemple, le développement de plateformes logicielles ouvertes dédiées pour soutenir la diffusion des connaissances et la collaboration internationale, la conclusion de contrats ou de CAE portant sur des énergies renouvelables, la fourniture de chaleur fatale, les projets visant à recréer et à renforcer les habitats perdus, les contributions au fonctionnement des services d'urgence régionaux), les éléments ont été étiquetés afin d'être considérés comme ayant un impact sociétal « plus large ». Ils ont été inclus uniquement dans le calcul d'une valeur actuelle nette plus large.

Les retombées économiques des visiteurs dépendent de l'existence d'un programme de visite, de points de visite dédiés, d'infrastructures et de guides. Les bénéfices signalés pour les visiteurs sur place viennent en addition par rapport au scénario contrefactuel dans lequel aucun projet de futur collisionneur de particules n'est mis en œuvre. Cela signifie qu'il est tenu compte des bénéfices probables en plus des effets générés par les visiteurs qui viennent au CERN après la fin du programme HL-LHC. Ce scénario contrefactuel devrait avoir moins d'impact, puisque le CERN sans nouveau projet phare à l'échelle mondiale est supposé être moins attrayant pour les visiteurs, comme le révèlent les récentes enquêtes menées auprès des visiteurs du CERN au cours du premier trimestre 2025. Certains bénéfices sont intangibles par nature, tels que les progrès de la connaissance scientifique, les impacts liés à la diplomatie scientifique, les considérations éthiques et la confiance dans la science. Bien que les bénéfices créés par les logiciels ouverts et les plateformes collaboratives aient un potentiel de valeur significatif, il est difficile d'estimer quels sont les bénéfices dont profitera la société, quand et de quelle manière, en l'absence d'un programme de création et de transfert d'innovation dédié à ces technologies.

Plusieurs autres bénéfices élargis ont été envisagés, mais n'ont pas été approfondis à ce stade en raison des contraintes de ressources et de temps liées à la clarification sans ambiguïté de la demande. Il s'agit par exemple du renforcement des réseaux électriques et de communication locaux et régionaux, de la création de mobilité douce, de la contribution à l'amélioration des transports publics, de la création de logements et d'infrastructures scolaires, du développement des entreprises et des services locaux. Cependant, l'étude a également porté sur le développement d'un cadre pour commencer à élucider les demandes de potentiels de bénéfices plus larges avec les municipalités dans le périmètre du projet. L'analyse socio-économique en cours et à venir permettra de mieux cerner ces opportunités, une fois que les demandes seront mieux comprises.

#### **4.8.4. Coût et facteurs externes négatifs**

Pour les calculs coûts-bénéfices, le FCC a été considéré comme un projet de conception à coût objectif, avec un investissement total comprenant 4 expériences et l'étape tt, estimé à environ 16,2 milliards de francs suisses (non actualisés) avec une marge d'incertitude de -5 % à +20 %. Ce chiffre englobe les études, les activités préparatoires, les travaux de conception, les travaux de génie civil, la création d'infrastructures techniques, tous les accélérateurs de particules (injecteurs, booster et collisionneur) et tous les coûts d'investissement liés aux quatre détecteurs d'expérience.

Les coûts de personnel comprennent toutes les ressources humaines impliquées dans le projet pendant toutes les phases du cycle de vie, quelle que soit l'organisation qui les emploie. Le total des frais de personnel se compose des salaires, des coûts indirects et des coûts liés à l'employeur sans les frais généraux. Il s'agit de moyennes pour différentes catégories de personnel dans les différents pays participant au projet. Au total, les frais de personnel représentent environ 16,8 milliards de francs suisses (non actualisés) et 7,5 milliards de francs suisses (actualisés).

Les coûts de fonctionnement correspondent à toutes les dépenses (tant en nature qu'en dépenses de trésorerie) nécessaires au fonctionnement, à la maintenance et à la réparation de l'infrastructure de recherche pendant toute la durée de l'exploitation scientifique (par exemple, l'électricité, l'eau, les pièces détachées et les ressources humaines pour la maintenance et les réparations). Le scénario probable pour les coûts opérationnels s'élève à un total de 4,4 milliards de francs suisses non actualisés, avec une plage d'incertitude due aux coûts incertains de certaines ressources (par exemple, l'électricité et l'eau), des fournitures et des contrats de service. Les coûts actualisés s'élèvent à environ 1,9 milliard de francs suisses. Cela correspond à un coût annuel moyen non actualisé d'environ 250 millions de francs suisses et d'environ 105 millions de francs suisses actualisés sur la durée d'exploitation qui s'étend de la mise en service à la fin de l'exploitation.

Les chiffres des coûts utilisés pour cette analyse, ainsi que le nombre prévu d'utilisateurs du projet, doivent être considérés comme une hypothèse de travail qui sert à estimer la performance socio-économique qui aide à identifier les principales voies d'impact. Cela permet également de comprendre quels sont les bénéfices potentiels qui peuvent encore être développés. Ces coûts sont formulés sur la base de la compréhension du projet au moment de l'analyse et devraient faire l'objet de révisions et d'affinements au fur et à mesure de l'avancement de la conception.

Les estimations des postes de coûts suivants, couvrant la période allant de la décision d'investissement à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee, ont été incluses dans l'analyse présentée :

- Dépenses d'investissement pour le génie civil, les infrastructures techniques, tous les accélérateurs de particules (injecteur, booster, collisionneur), y compris la mise à niveau pour l'exploitation et quatre expériences ;
- Coût de l'acquisition de tous les terrains pour les sites de surface, les accès et la mise en valeur de la nature autour des sites ;
- Coût de la création ou de la remise en état d'une route d'accès ;
- Création des infrastructures hors site nécessaires à la construction et à l'exploitation (par exemple, accès, approvisionnement en eau, traitement de l'eau, raccordements électriques locaux) ;
- Estimation complète des frais de personnel (CERN et collaboration internationale) nécessaires pour les phases de conception, de construction et d'exploitation couvrant les accélérateurs de particules, les infrastructures techniques et les expériences ;
- Coûts d'exploitation types (consommables, eau et énergie, maintenance, réparation) ;
- Coût du démantèlement du collisionneur de leptons et de ses infrastructures techniques spécifiques qui ne peuvent pas être réutilisées pour un collisionneur de hadrons ultérieur ;
- Valeur résiduelle négative des infrastructures pour un projet ultérieur de collisionneur de particules.

En plus des éléments mentionnés jusqu'à présent, une partie des investissements, impliquant des actifs réutilisables et durables tels que les systèmes de radiofréquence supraconducteurs, les infrastructures électriques, les structures de génie civil et les infrastructures techniques de base, sera utilisée pour un projet ultérieur de collisionneur de particules. Conformément aux lignes directrices de la CE sur l'analyse des coûts-bénéfices (p. 45, [224]), cette valeur résiduelle est présentée comme une valeur actualisée avec un signe moins dans la partie « coûts ». La valeur résiduelle des actifs de la phase initiale est importante et contribue à la durabilité du programme intégré du FCC. La valeur actualisée estimée s'élève à environ 2,5 milliards de francs suisses, ce qui équivaut à 24 % de l'investissement total.

Les estimations des facteurs externes négatifs suivants ont été inclus dans l'analyse présentée :

- Coût de la gestion des matériaux excavés en tant que partie du coût d'investissement ;
- Coût fictif du carbone pour le génie civil et l'énergie utilisée pour le fonctionnement ;
- Coût des mesures de renaturation à proximité des sites de surface (par exemple, préservation et amélioration des zones humides, création d'arbres pour compenser le déboisement et création de prairies et de pâturages) dans le cadre du coût d'investissement ;
- Perte économique (directe, indirecte en amont et induite en aval) causée par la consommation de terres agricoles pendant une période de 30 ans ;
- Valeur économique des forêts défrichées ;
- Valeur économique de la perte d'habitat et de biodiversité ;
- Coût sociétal du bruit lié à la construction et à l'exploitation ;
- Coût sociétal de l'augmentation du trafic et de la pollution de l'air induite par le transport des matériaux excavés ;
- Coût sociétal des rayonnements ionisants supplémentaires ;
- Coût sociétal des déchets radioactifs en tant que partie du coût d'exploitation.

#### **4.8.5. Voies d'impact**

Les voies d'impact suivantes ont été incluses dans l'analyse, soit en tant qu'éléments centraux, soit en tant que bénéfices potentiels plus larges :

- Valeur de la production de contenu scientifique ;
- Valorisation professionnelle des scientifiques et ingénieurs en début de carrière ;
- Valeur du tourisme sur place ;
- Valeur de la présence en ligne et des activités sur les réseaux sociaux ;
- Valeur des retombées industrielles liées à la construction d'infrastructures, d'accélérateurs et d'expériences.
- Valeur marchande des entreprises dérivées des TIC sur la base de la fréquence de création d'entreprises dérivées passées et présentes au CERN ;
- Valeur sociétale des produits logiciels ouverts ;
- Valeur marchande de la chaleur fatale fournie et valeur sociétale des émissions de carbone évitées ;
- Valeur marchande des sources d'énergie renouvelable supplémentaires créées à la suite d'accords d'achat d'électricité à long terme ;
- Valeur marchande des eaux usées traitées ;
- Valeur sociétale des zones humides, prairies, pâturages et forêts amendés et recréés ; – Valeur économique des espaces agricoles compensés ;
- Valeur sociétale des services régionaux d'urgence et de lutte contre l'incendie nécessaires à la nouvelle infrastructure de recherche.

Les voies d'impact suivantes sont considérées comme très fiables et constituent donc un ensemble de bénéfices fondamentaux sur lesquels la valeur actuelle nette prudente se fonde :

1. Valeur des publications scientifiques produites et citées ;
2. Prime salariale à vie des chercheurs et ingénieurs en début de carrière âgés de moins de trente ans ;
3. Valeur incrémentale pour les fournisseurs en raison des contrats récurrents qui résultent de leur activité dans le projet ;
4. Valeur des visiteurs sur place basée sur la méthode des coûts de déplacement et les dépenses locales ;
5. Valeur du temps de loisir des personnes qui consomment des contenus liés au projet, en ligne et sur les réseaux sociaux ;
6. Valeur estimée des logiciels ouverts développés dans le domaine des détecteurs de particules et des expériences, utilisés par d'autres instituts scientifiques et secteurs industriels.

La première voie d'impact évaluée est la valeur dérivée de la production de contenu scientifique. Elle découle du flux de connaissances généré par les scientifiques et les ingénieurs engagés dans le collisionneur et ses expériences, ce qui se traduit par diverses productions scientifiques, allant d'articles de revues et de documents de travail, en passant par des comptes rendus de conférences et des présentations. Ces produits peuvent avoir un impact durable, au-delà de la communauté de la physique des particules et des hautes énergies, en influençant éventuellement d'autres domaines de connaissance et en relevant des défis sociétaux plus vastes. Des techniques scientométriques ont été utilisées pour estimer la production scientifique et sa propagation à partir du projet FCC-ee. La méthodologie a consisté à analyser les tendances historiques observées dans des programmes de recherche en physique comparables tels que le Tevatron, le LEP et le LHC. Les concepts économiques de coût d'opportunité et de valeur du temps ont été utilisés pour déterminer la valeur sociale des productions scientifiques. Cette approche considère le temps consacré par les personnes, en fonction de leur implication et de leurs responsabilités, à une collaboration expérimentale pour produire ces résultats et valorise ce temps sur la base de leur salaire horaire moyen. Cette méthode a été appliquée pour estimer la valeur sociale des productions scientifiques produites par les chercheurs directement impliqués dans le programme de recherche (productions dites « de niveau 0 »), celles qui font référence aux connaissances initiales de niveau 0 (productions dites « de niveau 1 »), et les productions qui font référence aux résultats de niveau 1 (productions dites « de niveau 2 »). Entre 34 000 et 38 000 productions scientifiques devraient être réalisées directement dans le cadre du projet FCC-ee (publications de niveau 0), et 538 000 à 618 000 productions de niveau 1 et 2 supplémentaires devraient être générées sur la base de ce corpus jusqu'en 2083 (voir Fig. 4.11).

Sustainability/img/distribution-scientific-products-2.pdf

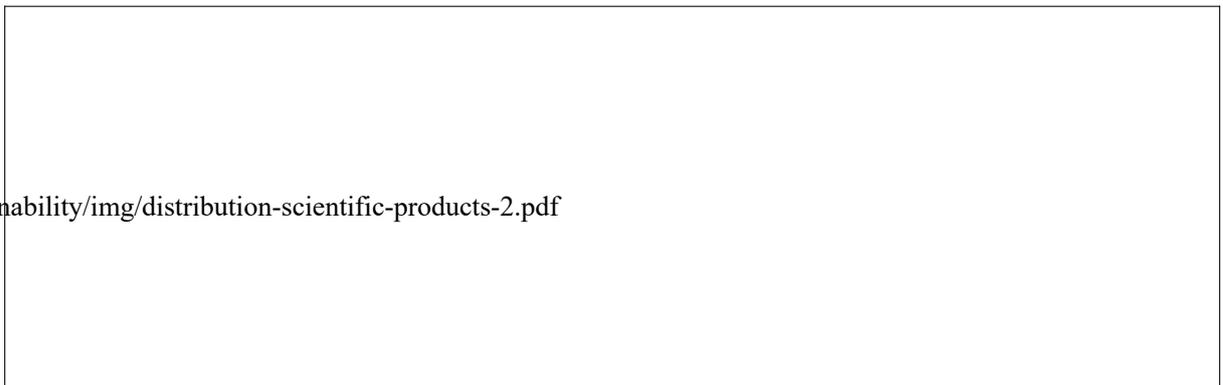


Fig. 4.11 : Distribution attendue des productions scientifiques du FCC-ee au fil du temps.

Si l'on considère qu'environ 55 % du temps passé par les chercheurs est consacré aux activités de recherche scientifique et à la production de résultats scientifiques, mais que seuls 22 % environ peuvent être attribués à des produits scientifiques spécifiques au FCC-ee, le bénéfice estimé de la production scientifique est d'environ

6,51 milliards de francs suisses sans actualisation et d'environ 2,8 milliards de francs suisses avec actualisation. Cette évaluation tient compte de la valeur décroissante des produits de niveaux 1 et 2, par rapport aux produits de niveau 0, étant donné que la connaissance se propage à travers les vagues de production ultérieures et que l'apport initial du FCC-ee diminue progressivement.

La deuxième voie d'impact étudiée est la valeur de la formation à la recherche et à l'ingénierie en début de carrière, qui reflète le rôle du projet dans la transmission des connaissances, l'encouragement au développement des compétences et la création de capacités pour les personnes engagées activement dans le programme de recherche tout au long de son cycle de vie. Cette valeur découle du fait que les personnes qui ont participé au CERN à des projets scientifiques et de haute technologie multisectorielle à grande échelle représentent une valeur plus élevée pour leurs employeurs éventuels que les personnes qui n'ont pas bénéficié d'une telle expérience de formation. Cela se traduit par des salaires de départ plus élevés et une croissance plus rapide des salaires. L'effet persiste jusqu'à ce que les personnes prennent leur retraite et conduit à une valeur ajoutée globale par rapport à leurs pairs qui n'ont pas vécu cette expérience. L'analyse a spécifiquement évalué les bénéfices accumulés par les étudiants des filières techniques, les doctorants, les chercheurs postdoctoraux et le personnel scientifique et technique associé, jusqu'à un âge limite de 30 ans. L'analyse n'a pas pris en compte la valeur de la formation des apprentis et d'autres personnels hautement qualifiés ayant des contrats à durée limitée, de la main-d'œuvre temporaire et des travailleurs sous contrat. Le bénéfice a été quantifié en estimant les améliorations en termes d'évolution de carrière tout au long de la vie pour les participants qui entrent sur le marché du travail, après avoir acquis une expérience professionnelle dans le cadre du programme de recherche. Des études antérieures, validées par une enquête menée auprès d'environ 2 600 personnes, indiquent que l'avantage salarial à vie pour un chercheur en début de carrière travaillant sur le FCC-ee varie d'un minimum de 2 % à 10 % pour la période moyenne de séjour dans l'infrastructure de recherche (3,78 années) (voir Fig. 4.12). Le bénéfice socio-économique total non actualisé est évalué à environ 20,7 milliards de francs suisses et la valeur actualisée à environ 5,0 milliards de francs suisses.

La troisième voie d'impact explore les bénéfices générés par le projet pour les fournisseurs industriels engagés dans la construction de l'infrastructure, des accélérateurs de particules et des détecteurs. Le bénéfice provient de l'augmentation des performances financières des fournisseurs quelques années après qu'ils ont reçu des contrats dans le cadre du projet. Le fait d'être un fournisseur dans un projet d'envergure, en particulier dans des domaines caractérisés par des conceptions, des développements et des adaptations spécifiques au projet de produits et de services disponibles sur le marché, est lié à l'acquisition d'expérience,

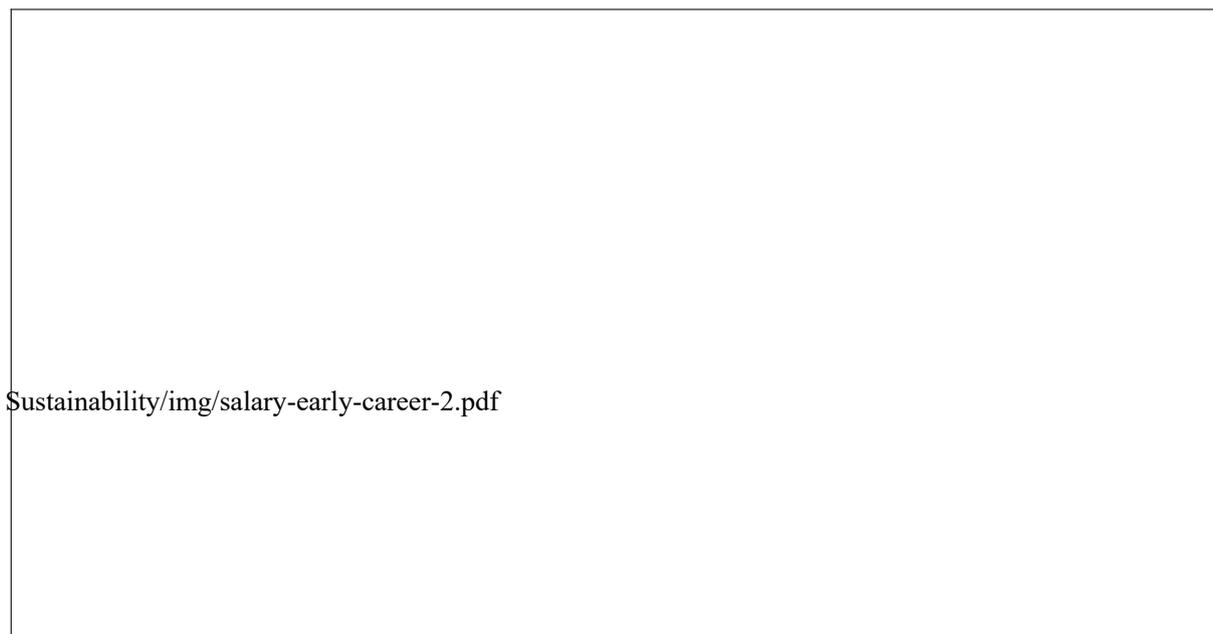


Fig. 4.12 : Salaire à vie des chercheurs en début de carrière par secteur d'emploi.

à l'augmentation de l'efficacité et à un accès élargi au marché. En fait, l'impact découle d'un gain de connaissances acquis grâce à une collaboration étroite avec l'infrastructure de recherche. Ces connaissances contribuent à leur tour à la création et à l'amélioration de nouveaux processus, produits et services que les fournisseurs peuvent exploiter sur d'autres marchés et dans d'autres domaines. Il en résulte des contrats supplémentaires que le fournisseur est en mesure de conclure grâce aux connaissances acquises. Cette succession de causes, d'effets et d'impacts a fait l'objet d'une analyse exhaustive au cours des dernières décennies et s'est révélée robuste et stable. Un multiplicateur de profit a été déterminé, s'élevant à 1,96 pour les achats d'articles à intensité technologique faible ou modérée et à 3,06 pour les achats d'articles à forte intensité technologique. En appliquant ce multiplicateur aux investissements susceptibles de générer d'autres retombées industrielles, les bénéfices non actualisés sont estimés à 17,6 milliards de francs suisses. Les bénéfices actualisés sont estimés à 9,6 milliards de francs suisses (voir Fig. 4.13).

La quatrième voie d'impact concerne les bénéfices générés par les visiteurs sur place. Avant 2020, le CERN accueillait 150 000 visiteurs par an. En 2024, après l'ouverture du nouveau centre d'accueil des visiteurs Portail de la science (Science Gateway), ce nombre est passé à environ 350 000 visiteurs externes (sans compter les visites des personnes participant aux projets du CERN, les visites d'entreprises et les visites des familles des employés, qui représentent environ 40 000 personnes supplémentaires). Alors que pendant la période précédant son ouverture, la participation était également répartie entre les visites de groupes et les visites individuelles, l'augmentation significative de la capacité d'accueil des visites non guidées a entraîné un changement dans la répartition. Aujourd'hui, environ 76 % des personnes visitent le CERN à titre individuel et 24 % font partie de groupes qui profitent de la possibilité de visiter également les installations d'expériences, en particulier celles qui sont liées au LHC. Parmi ces visiteurs, 55 % sont classés comme des visiteurs « motivés par le CERN », dont le but premier du voyage était de visiter le CERN, tandis que 45 % sont des visiteurs « motivés par la région », qui se sont rendus dans la région pour d'autres raisons et ont profité de l'occasion pour visiter également le CERN. Le nombre absolu de personnes faisant partie de groupes de visite est resté relativement stable. Deux campagnes d'entretiens systématiques guidés avec des visiteurs présents sur le site avant et après l'ouverture du Portail de la science ont permis de fidéliser sur plusieurs années le comportement des visiteurs en matière de dépenses (voir Fig. 4.14). Au total, plus de 4 000 personnes ont été interrogées et seules environ

Sustainability/img/benefits-suppliers-2.pdf

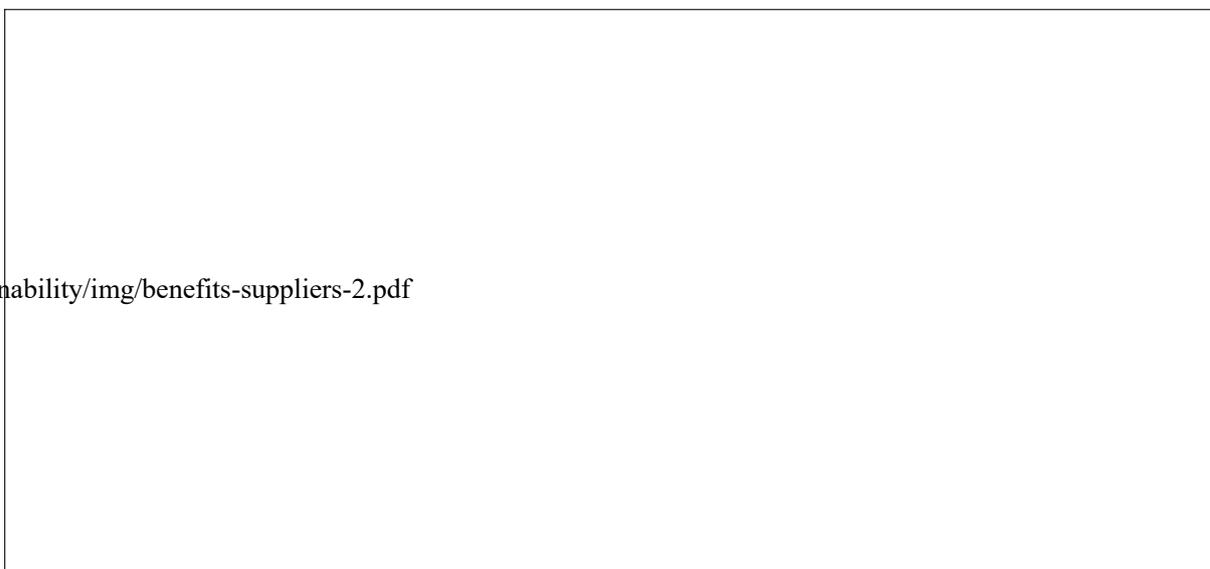


Fig. 4.13 : Profil temporel des bénéfices de l'industrie des FCC-ee pour les fournisseurs, par rapport aux coûts des investissements de haute technologie (francs suisses, non actualisés - scénario de base).

3 550 réponses cohérentes et crédibles ont été retenues pour l'analyse. Le séjour moyen des personnes dans la région est de 3,75 jours, ce qui indique qu'une fois qu'elles ont visité le CERN, elles étendent leur visite à d'autres destinations dans les environs.

Les dépenses locales associées à la visite varient entre 625 francs suisses pour les visiteurs en groupe et 713 francs suisses pour les visiteurs individuels, avec une moyenne de 691 francs suisses pour l'ensemble des visiteurs. Sur la base de l'enquête formant un échantillonnage de la répartition des dépenses des visiteurs, la somme des dépenses locales des 35 000 visiteurs annuels sur place se traduit par un bénéfice économique tangible pour la région d'environ 250 à 350 millions de francs suisses par an. Ce chiffre ne tient toutefois pas compte des bénéfices socio-économiques liés au programme FCC-ee. Sur la base de l'enquête actuelle, seule une certaine fraction des futurs visiteurs peut être attribuée à un FCC. Comme indiqué initialement, l'analyse limite les bénéfices potentiels aux effets incrémentaux, c'est-à-dire à la différence entre les effets des visiteurs sur place qui peuvent être attribués à l'existence du FCC et l'évolution du CERN en l'absence du FCC. C'est pourquoi les hypothèses suivantes ont été utilisées pour estimer le bénéfice socio-économique supplémentaire pour le FCC-ee :

- Visites conventionnelles au CERN : une part croissante de ces visiteurs est attribuée au FCC-ee, commençant à 0 % en 2024 et augmentant progressivement jusqu'à 50 % en 2064 ;
- Visiteurs des sites de construction du FCC-ee et des quatre sites d'expérience : ces visiteurs sont entièrement attribués au FCC-ee, car ils n'auraient pas été pris en compte dans un scénario sans FCC-ee ;
- Visites du tunnel LHC désaffecté : si l'on adopte une approche prudente, elles ne sont pas attribuées au FCC-ee car elles seraient justifiées même en l'absence du FCC-ee ;
- Visites des centres de visiteurs des expériences du FCC ;
- Environ 10 % de tous les visiteurs se rendent sur le site principal du CERN ;
- Visiteurs des journées portes ouvertes : ils sont attribués au FCC-ee uniquement pour la capacité supplémentaire créée par le nouvel accélérateur ; tous les autres visiteurs sont exclus du décompte.

Sur la base de ces hypothèses, on estime que sur près de 19 millions de visiteurs pendant toute la période d'observation, seuls 5,5 millions environ devraient être attirés par le FCC-ee (voir Fig. 4.15), les autres étant davantage motivés par l'activité générale du CERN et sa réputation de longue date en matière d'excellence scientifique mondiale.

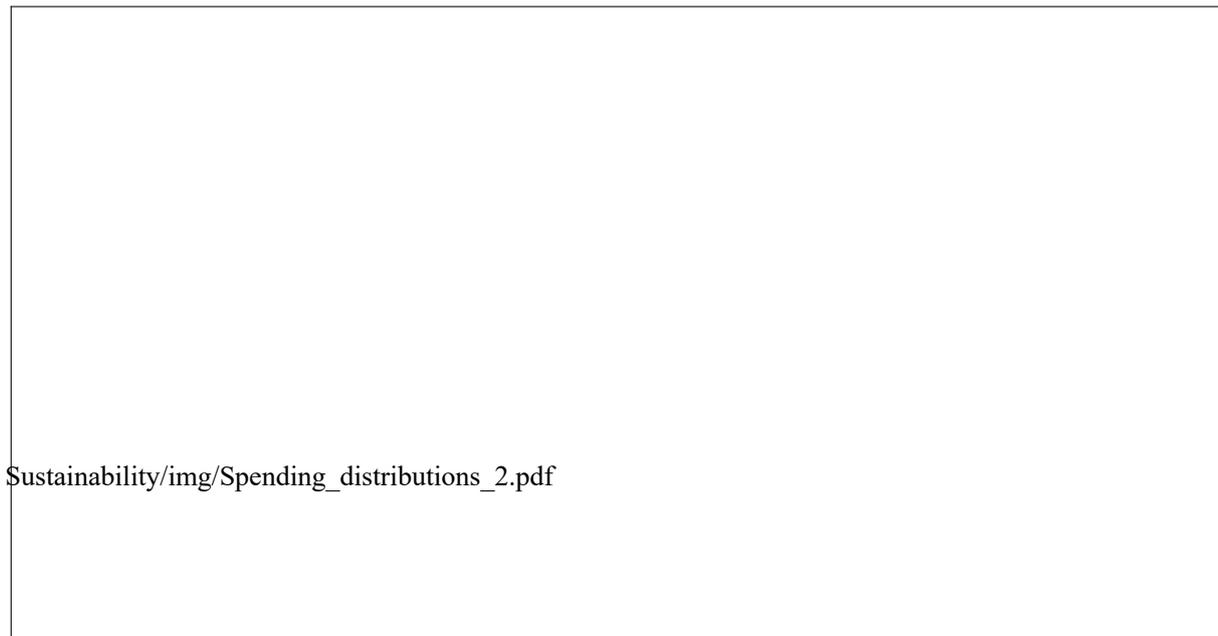


Fig. 4.14 : Répartition des dépenses de tous les visiteurs du site, des visiteurs individuels et des visiteurs qui viennent au CERN en tant que membres d'un groupe.

Si l'on considère que seul le bénéfice différentiel est rapporté ici, la différence entre le nombre de visiteurs que le CERN accueillerait sans et avec un FCC-ee est d'environ 13,5 millions sur la période d'observation.

Le bénéfice pour les visiteurs du site a été valorisé à l'aide de la méthode des coûts de déplacement, qui intègre les coûts supportés par les visiteurs pour se rendre au CERN et au FCC, la valeur économique du temps passé en déplacement, ainsi que les dépenses locales liées à leur visite, sur la base de deux enquêtes réelles menées au CERN sur deux années (avant et après la COVID). Le bénéfice actualisé généré par environ 5,5 millions de visiteurs sur site attribuables au FCC-ee est estimé à environ 2,1 milliards de francs suisses.

La cinquième voie d'impact analysée concerne les visiteurs virtuels qui consomment des pages web et des réseaux sociaux. En raison de la disponibilité limitée des données, les analyses n'ont porté que sur les sites web et les canaux de réseaux sociaux directement gérés par le CERN. L'estimation sous-estime donc considérablement les bénéfices réels générés par les nombreux contenus en ligne mis à disposition à l'échelle mondiale.

Le nombre de visiteurs en ligne estimé est basé sur les données historiques collectées par le groupe de communication du CERN concernant les visites du site web principal du CERN et les comptes de réseaux sociaux. Des hypothèses ont été formulées quant au nombre de visites spécifiquement liées au FCC-ee. Cette estimation a été révisée pour tenir compte des changements survenus dans le calendrier du projet et pour assurer la cohérence avec les révisions apportées à l'estimation des visiteurs sur place, en particulier en ce qui concerne la part d'attribution au FCC-ee. On suppose que la part attribuable la plus élevée des visites est d'environ 50 %, ce qui correspond à l'hypothèse faite pour les visiteurs du CERN.

Sustainability/img/onsite\_visitors\_2.pdf



Fig. 4.15 : Nombre de visiteurs sur site attirés par le FCC-ee au cours de la période 2024-2064, utilisé pour l'estimation de l'impact.

Dans le scénario sans le FCC, on suppose que le nombre de visites en ligne sur les sites web et les réseaux sociaux suivra les mêmes tendances que les visiteurs sur place en l'absence du FCC-ee. Dans le scénario avec le FCC, le nombre de visites en ligne correspond à la tendance de croissance des publications scientifiques permise par le programme de recherche FCC-ee prévu. La part des visites en ligne pouvant être

attribuée au FCC-ee commence par représenter une part marginale du total des visites en ligne du CERN. Le principal bond en avant des visites en ligne devrait se produire avec le début de l'exploitation. Cette part devrait encore augmenter au cours de la phase opérationnelle. Le nombre de visiteurs en ligne devrait atteindre son maximum quelques années après 2050. Au cours de ces années, on considère de façon prudente que la part du total des visites en ligne du CERN associée au FCC atteint environ 50 % et reste constante. Cette hypothèse est conforme aux résultats de l'enquête menée auprès des visiteurs sur site sur les raisons qui les poussent à visiter le CERN aujourd'hui. – Sur la base de ces hypothèses, pour la période 2024-2064, les impressions sont estimées à 1,7 milliard, les engagements à 79 millions et les visites du site web du CERN à 175 millions. Ces estimations sont très prudentes et ne tiennent pas compte des développements futurs des réseaux sociaux et des plateformes en ligne qui sont susceptibles d'apparaître, mais dont l'existence ne peut être anticipée à l'heure actuelle.

La valorisation de ces visites repose sur l'observation effective d'une présence en ligne d'un peu plus de 3 minutes. Les distributions sont appliquées aux différents types de médias tels que les interactions avec les réseaux sociaux et la consommation de séquences vidéo en ligne liées au FCC. La valeur du temps passé est déterminée à l'aide de la méthode du « coût d'opportunité », qui suggère que le temps passé sur les réseaux sociaux et les sites web représente une occasion manquée de s'engager dans d'autres activités potentiellement rentables. Étant donné que tous les visiteurs virtuels ne font pas nécessairement partie de la main-d'œuvre économiquement active, le coût d'opportunité du temps a été estimé en utilisant le PIB par habitant (au lieu des salaires), ajusté en fonction de la répartition géographique des visiteurs virtuels. Le bénéfice culturel total non actualisé pour les visiteurs en ligne est estimé à environ 229 millions de francs suisses, ce qui correspond à 102 millions de francs suisses actualisés.

La sixième voie d'impact fondamentale englobe les logiciels, systèmes et plateformes libres et gratuits ayant un lien de causalité avec le programme de recherche. On suppose que les logiciels liés aux projets d'expériences et de détecteurs génèrent une valeur sociétale supplémentaire en raison de leur adoption par d'autres projets scientifiques, instituts de recherche et entreprises ayant des besoins particuliers qui ne peuvent pas être facilement satisfaits par des logiciels disponibles dans le commerce. Si la première base d'utilisateurs se trouve généralement dans les domaines de la physique, de l'astronomie et de la recherche médicale, les entreprises qui utilisent ces logiciels peuvent être très diverses. Les exemples récents d'utilisation de logiciels issus des expériences LHC vont des systèmes spatiaux d'observation de la terre à l'imagerie médicale et à l'exploitation minière, en passant par le trafic des conteneurs maritimes et l'analyse des transactions boursières. Essentiellement, dans toutes les applications comportant de très grandes quantités de données à traiter, des modèles devant être identifiés dans des environnements dominés par des données contextuelles, des applications critiques exigeant des solutions personnalisées, et pour lesquelles l'efficacité du traitement des données est la clé du succès, les développements des scientifiques et des ingénieurs en physique des particules sont recherchés.

L'estimation de cette voie de bénéfices repose sur l'utilisation de logiciels de modélisation et de simulation de détecteurs de particules, dont l'utilisation en dehors des principaux intéressés a pu être suivie au cours des dernières années. Cela sert de « proxy » pour des développements comparables dont la nécessité a été confirmée lors du développement de détecteurs et d'expériences FCC. Comme l'analyse des logiciels, les nouveaux logiciels peuvent trouver application au-delà du groupe des principaux intéressés, générant ainsi des retombées positives pour la société. Un certain nombre de développements concerneront l'utilisation de l'intelligence artificielle dans ce domaine, le matériel configurable, l'informatique de pointe et les technologies de communication de données en constante évolution. Bien que plusieurs de ces développements soient entachés d'incertitudes, comme le passé l'a montré, il est probable que les collaborations autour des expériences FCC-ee pourront apporter des contributions significatives dans le domaine des TIC.

Pour les logiciels de modélisation et de simulation des détecteurs, environ 50 centres de recherche, agences spatiales et entreprises ont été identifiés comme utilisant des logiciels développés pour les expériences LHC. Parmi eux, 38 institutions autres que le CERN ont contribué d'une manière ou d'une autre aux développements. On peut citer, par exemple le Laboratoire national de l'accélérateur Fermi (Fermilab), le Laboratoire national de l'accélérateur SLAC, le Centre for Medical Radiation Physics et l'Agence spatiale européenne. En outre, 12 autres laboratoires, instituts et entreprises utilisent ce logiciel sans contribuer à son développement. Il s'agit, par exemple de la NASA, de General Electric, de Philips, de Siemens, de Varian, de

Boeing et de General Motors. Le CERN ne suit pas systématiquement le nombre d'utilisateurs et d'installations, mais les données disponibles en 2023 suggèrent une communauté d'utilisateurs actuelle d'environ 95 instituts contributeurs (à l'exclusion du CERN). En supposant que le rapport de 3:1 entre les institutions contributrices et non contributrices reste stable, le nombre total d'utilisateurs non contributeurs est estimé à environ 30. En l'absence de données plus fiables, cette estimation est considérée comme raisonnable et prudente.

Le bénéfice est estimé en tant que coût évité pour les utilisateurs externes et il est basé sur le coût de production d'un nouveau logiciel comparable. Il a été estimé que le coût de production des logiciels de modélisation et de simulation de détecteurs existants s'est élevé à environ 44,2 millions de francs suisses jusqu'en 2013, couvrant les 20 premières années de leur développement à partir de 1994. Le CERN a contribué à environ 50 % de ce coût (22 millions de francs suisses), le reste étant financé par d'autres contributeurs externes. Les estimations sont basées sur l'hypothèse de chiffres de coûts comparables pour les logiciels liés au FCC-ee et en supposant que la contribution du CERN reste de 50 %. Le coût évité pour chaque organisation contributrice est le coût de production total estimé moins sa contribution spécifique, tandis que le coût évité pour les utilisateurs non contributeurs est le coût de production total. On suppose qu'un nouveau logiciel sera disponible pour la première fois après 5 ans de développement et que les développements se poursuivront au fil des ans, même pendant la phase d'exploitation, en raison de l'intérêt continu des universités et de l'industrie.

Dans ce scénario, le coût évité total cumulé représentant le bénéfice total non actualisé est estimé à environ 7,4 milliards de francs suisses. Le bénéfice actualisé est d'environ 4,4 milliards de francs suisses. En fait, ce bénéfice s'applique en principe à toute une série de développements logiciels potentiels qui ne peuvent pas être étudiés en détail à ce stade précoce. Il est conseillé que tout développement futur prévoie un mécanisme d'accès libre à ces logiciels, qu'il en assure la promotion active dans des domaines scientifiques et industriels en dehors de la communauté de la physique des particules et, surtout, qu'il comprenne un suivi systématique des utilisateurs actifs afin de rendre les estimations de l'impact socio-économique plus précises et plus fiables.

#### ***4.8.6. Bénéfices élargis***

Un certain nombre de bénéfices élargis ont été analysés en détail en plus des bénéfices principaux présentés dans la section précédente. En raison des incertitudes liées aux possibilités de transformer ces bénéfices potentiels plus larges en impacts tangibles, ils ne sont pas pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de la ligne de base de référence. L'analyse et la quantification de ces bénéfices potentiels sont toutefois basées sur des observations factuelles des effets et résultats passés et sont donc solides en ce qui concerne la valorisation. Comme pour les bénéfices fondamentaux, des hypothèses de travail très prudentes ont été établies et seuls les effets pouvant être justifiés de manière crédible ont été inclus. C'est pourquoi une deuxième valeur actualisée nette est présentée, qui inclut ces bénéfices élargis. Pour transformer ces potentiels en impacts tangibles, la phase préparatoire de mise en œuvre du futur projet doit inclure un travail spécifique qui planifie cette création de bénéfices. Des objectifs et des engagements volontaires sont nécessaires de la part des maîtres d'ouvrage pour mettre en place des instruments permettant de transformer les potentiels en impacts. Enfin, un contrôle et un suivi devront être mis en place pour assurer le suivi de l'impact généré.

Les bénéfices plus larges suivants ont été étudiés et sont brièvement présentés dans cette section :

1. Plateforme d'information ouverte ;
2. Logiciel collaboratif ouvert ;
3. Création d'entreprises dérivées dans le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC)
4. Développement de sources d'énergie renouvelables ;
5. Fourniture de chaleur fatale ;
6. Éviter les gaz à effet de serre en remplaçant les sources traditionnelles d'énergie thermique par de la chaleur fatale récupérée et fournie ;
7. Amélioration et création d'habitats et augmentation de la biodiversité ;
8. Renforcement des services d'urgence locaux.

Un futur projet mondial de recherche collaborative repose sur une plateforme d'information scientifique et technique ouverte et à long terme qui permet à la communauté de mettre ses connaissances à la disposition du plus grand nombre afin qu'elles deviennent repérables, accessibles, interopérables et réutilisables (principe FAIR). Le CERN a une longue expérience dans la mise en place de telles infrastructures, dont la plus connue est le World Wide Web. Cette technologie a permis par la suite le développement et la mise à disposition de services supplémentaires comme le serveur documentaire CERN Document Server (CDS) qui est basé sur la plateforme Invenio développée en interne. Cette évolution a conduit à la création du service Zenodo que la Commission européenne a approuvé en tant que référentiel documentaire général pour toutes les recherches financées par l'UE. Le CERN exploite aujourd'hui pour la Commission européenne cette plateforme qui fait entièrement partie de l'European Open Science Cloud (EOSC). En continuant à être à l'avant-garde de la « mégascience », le CERN peut jouer un rôle de premier plan dans la fourniture d'informations scientifiques et techniques en Europe et à l'échelle mondiale. Le lancement d'une nouvelle mission scientifique d'envergure, le FCC, justifie non seulement la poursuite des développements en cours, mais conduira probablement aussi au développement et à la mise en œuvre d'une nouvelle génération de systèmes d'information, à l'instar de ce qui s'est produit dans le passé. Une telle plateforme peut offrir des fonctionnalités qui vont au-delà de la simple gestion des documents et des données et de la conservation des données à long terme. Elle pourra offrir des services qui sont aujourd'hui impossibles à concevoir. Afin d'estimer la valeur potentielle d'un tel développement futur, la valeur de la plateforme Zenodo a été estimée en tant que référence prudente avec une fonctionnalité minimale offerte à la société d'aujourd'hui. Cela a été possible parce que des données historiques de qualité suffisante pour les périodes concernées ont pu être identifiées. Un modèle économétrique a été construit pour estimer l'impact socio-économique de ce référentiel d'informations virtuel, conçu pour répondre aux besoins de stockage et d'utilisation de l'information collaborative. La valorisation estimée est dérivée des bénéfices mesurables associés à des référentiels comparables, comprenant le stockage de données, l'utilisation en ligne et les téléchargements, déduction faite de la valeur actuelle des coûts de développement, d'exploitation et de maintenance.

La valeur non actualisée sur la période d'observation FCC-ee d'une telle plateforme est de 5 milliards de francs suisses et sa valeur actualisée est d'environ 2,7 milliards de francs suisses. Pour que ce potentiel d'impact devienne réalité, plusieurs conditions préalables s'appliquent : la communauté mondiale participant au projet doit avoir une demande pour une telle plateforme, la communauté doit s'engager à utiliser la plateforme, les communautés au-delà du domaine de la physique des hautes énergies et des particules doivent adopter la plateforme (comme ce fut par exemple le cas avec la plateforme Zenodo approuvée par la Commission européenne). Les exigences fondamentales reposent sur l'intention de jouer le rôle de développement et d'exploitation d'une plateforme d'informations pour plusieurs communautés d'utilisateurs. Un engagement soutenu à long terme des ressources et un plan de diffusion des développements au-delà de la communauté de base sont également nécessaires.

Un autre cas typique de plateformes ouvertes dans l'histoire des grandes collaborations internationales du CERN est la création d'outils qui soutiennent le travail collaboratif. Le système de gestion des événements « Integrated Digital Conference » (Indico) est un exemple de ce type de développement. Il a révolutionné la gestion des réunions physiques et virtuelles, des exposés et des conférences et a conduit à une documentation

complète du travail collaboratif. Il peut être considéré comme un catalyseur clé des projets collaboratifs mondiaux. Depuis le début de son développement en 2002, la plateforme s'est étendue à de nombreuses organisations universitaires et internationales dans le monde entier. Un futur projet à grande échelle n'a pas seulement des besoins très similaires, mais il créera des exigences qui vont au-delà de celles qui sont satisfaites avec cette plateforme à l'heure actuelle. L'intégration de l'écriture collaborative, la schématisation, l'assistance de l'IA pour les réunions et la prise de notes, la traduction en différentes langues, la gestion de la collaboration, la vidéoconférence, l'enregistrement et la publication des supports, la messagerie en temps réel, les espaces de travail partagés, l'intégration avec les processus de gestion documentaire, l'approbation et la distribution d'informations sélectionnées ne sont qu'un choix d'exemples pour lesquels le besoin commence dès aujourd'hui à apparaître dans le cadre des études liées au FCC.

Ce sont les raisons pour lesquelles la plateforme Indico actuelle a été choisie comme un exemple conservateur et représentatif de plateforme de collaboration à même d'autoriser et d'améliorer le travail collaboratif futur dans le cadre d'un projet à grande échelle. La valeur générée par le développement d'un nouveau service pour faciliter la collaboration mondiale impliquée dans le projet FCC en termes de réunions, d'appels et de gestion d'événements a été évaluée en considérant le consentement à payer (CAP) des utilisateurs privés pour un ensemble d'outils comparables, totalisant 7,5 milliards de francs suisses sans actualisation et 3,5 milliards de francs suisses avec actualisation. Étant donné que le potentiel d'un tel écosystème nouveau nécessite un engagement de développement, l'adoption par des communautés au-delà de la physique des hautes énergies et des particules, la valeur n'a été considérée que comme un bénéfice élargi.

Les archives des bureaux de transfert de connaissances des deux dernières décennies ont montré qu'un nombre stable d'entreprises ont été créées chaque année par des personnes ayant participé au projet phare de collisionneur de particules du CERN et aux collaborations internationales sur les détecteurs d'expériences. Un exemple frappant est celui de Proton AG, qui emploie plus de 400 personnes, qui compte plus de 100 millions de clients et qui offre des services de courrier électronique sécurisé et de réseau privé virtuel (VPN) sans commune mesure avec les autres fournisseurs de services. D'autres exemples sont Advacam qui s'est spécialisée dans les dispositifs d'imagerie pour diverses applications industrielles basées sur la technologie des détecteurs de particules, LightEye qui travaille sur la technologie LiDAR pour les mesures de vitesse du vent à longue portée afin d'améliorer la sécurité aérienne et PlanetWatch qui s'est spécialisée dans l'acquisition de données environnementales. Sur la base de ces données historiques factuelles, on suppose que le FCC-ee générera environ deux nouvelles entreprises dérivées dans le seul secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) 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 chaque année et de la valeur de marché annuelle des entreprises du secteur des TIC, le bénéfice socio-économique est estimé à au moins 832 millions de francs suisses sans actualisation et à 409 millions de francs suisses avec actualisation. Ce chiffre n'inclut pas les bénéfices économiques générés par de nombreuses micro-entreprises et consultants indépendants qui exercent leurs activités grâce à l'expérience et aux compétences qu'ils ont acquises dans le cadre de projets d'accélérateurs de particules et de détecteurs d'expériences à grande échelle.

Certains bénéfices environnementaux que le projet pourrait générer ont également été évalués. Il s'agit, par exemple, de l'objectif volontaire d'alimenter l'infrastructure en électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable. La conclusion de contrats spécifiques d'alimentation en énergie et de contrats d'achat d'électricité (CAE) à long terme sert de levier pour développer de nouvelles sources d'énergie renouvelable, puisque le fournisseur d'électricité peut garantir le financement à long terme de nouveaux projets d'investissement en énergies renouvelables avant de prendre une décision d'investissement financier. Un scénario de portefeuille de contrats complémentaires d'alimentation en énergie pour la construction et l'exploitation du FCC a été analysé en fonction de cette voie de génération de valeur. En supposant qu'après 2050 la société sera largement décarbonisée et en faisant l'hypothèse prudente qu'il n'y aura pas de demande croissante pour un tel instrument de financement sur un horizon temporel de plus de 30 ans, le bénéfice mentionné reste limité : 227 millions de francs suisses sans actualisation et 117 millions de francs suisses avec actualisation. Le développement d'un portefeuille d'énergies renouvelables peut en principe commencer par une décision d'investissement pour un nouveau projet de collisionneur de particules et un engagement du projet à utiliser des sources d'énergie renouvelable. Dans ce cas, le bénéfice potentiel peut rapidement se transformer en un bénéfice économique tangible. Il est suggéré que ce bénéfice soit révisé à ce moment-là et réexaminé en fonction de l'évolution des conditions limites de mise en œuvre du projet.

Une grande partie de l'énergie servant à faire fonctionner le collisionneur de particules et ses expériences est convertie en chaleur. Traditionnellement, la chaleur est dissipée par des systèmes de refroidissement à base d'eau reliés à des tours d'évaporation. Une étude a été menée pour démontrer la faisabilité de la récupération et de la réutilisation de la chaleur fatale. La récupération et la fourniture de chaleur fatale est un concept intégré dès le départ à la conception du collisionneur de particules. La chaleur fatale récupérée sera fournie par des réseaux de chauffage urbain aux consommateurs situés au voisinage des sites FCC-ee. Le bénéfice environnemental provient du fait que l'énergie utilisée par l'infrastructure de recherche du FCC est réutilisée et fournie à des fins de chauffage et de refroidissement, ce qui permet d'éviter le recours à d'autres sources, principalement non renouvelables et à forte intensité de carbone, telles que le gaz, le bois, le pétrole et les sources d'électricité traditionnelles. Le bénéfice environnemental de la réutilisation de la chaleur fatale provient des émissions de gaz à effet de serre évitées dans le scénario du projet, dans lequel le CERN fournit de la chaleur fatale, produite à l'aide d'un mélange d'électricité plus propre, aux réseaux de chauffage urbain desservant les consommateurs à proximité des sites du FCC-ee. Ces émissions sont comparées à celles des autres méthodes de chauffage et de refroidissement généralement utilisées dans la région du CERN. Le bénéfice total est estimé à 170 millions de francs suisses sans actualisation, ce qui correspond à 74 millions de francs suisses après actualisation.

Cependant, pour transformer ce bénéfice potentiel en impacts socio-économiques tangibles, il faut adapter le calendrier d'exploitation à la courbe de la demande, conclure des accords avec les opérateurs de chauffage urbain pour mettre en place des réseaux et les exploiter, et s'assurer que les clients s'engagent à utiliser la chaleur. Étant donné que ces développements prennent généralement du temps, qu'ils impliquent des développements territoriaux qui durent une à deux décennies et qu'ils dépendent également de développements locaux autour des futurs sites de surface, les bénéfices ne sont pas inclus dans le calcul de la valeur actuelle nette de base. Par ailleurs, les bénéfices potentiels découlant de la réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce au remplacement des sources de chaleur conventionnelles sont incertains pour la période postérieure à 2050, date à laquelle l'économie vise en principe à être largement décarbonisée. L'ensemble des bénéfices potentiels, c'est-à-dire les coûts économisés en utilisant la chaleur résiduelle au lieu des sources de chaleur conventionnelles et en évitant les émissions de gaz à effet de serre, s'élèvent à environ 313 millions de francs suisses sans actualisation et à 132 millions de francs suisses avec actualisation. Une fois que la décision de réalisation d'un projet aura été prise, une révision de ces impacts pourra avoir lieu, car un engagement plus fort de la part du maître d'ouvrage permet également aux parties prenantes régionales de planifier les réseaux de chaleur fatale, ce qui conduira finalement à une augmentation significative des bénéfices potentiels.

Le projet ne se contente pas de consommer des terres en raison de l'aménagement de huit sites en surface, mais il ouvre également des possibilités de créer de nouveaux espaces naturels dans les environs immédiats des sites. La création ou l'amélioration de ces habitats pour bien intégrer les sites de surface dans leur environnement peut renforcer les espaces naturels autour des sites, les protéger d'une plus grande artificialisation et contribuer à améliorer la biodiversité, en compensant partiellement les effets de la perte d'espace. Si des projets de renaturation sont aujourd'hui prévus pour les sites de surface, ils n'ont pas encore été discutés avec les parties prenantes locales et n'ont pas encore été conçus techniquement. Ce bénéfice reste donc potentiel et n'est pas pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de base. La renaturation des habitats et la biodiversité pourraient représenter une valeur non actualisée de 0,4 million de francs suisses, correspondant à une valeur actualisée de 0,2 million de francs suisses.

Le futur collisionneur de particules sera intégré dans un territoire d'une superficie d'environ 30 x 30 km. On a veillé à sélectionner des sites de surface situés à proximité des principaux axes de transport. Néanmoins, le concept actuel mis en œuvre au CERN, qui consiste à fournir des services d'urgence, de secours et de lutte contre l'incendie aux sites de surface des accélérateurs de particules existants à partir d'un corps de pompiers central au CERN, devient irréalisable pour une future infrastructure à l'échelle du FCC. Le concept de sécurité prévoit donc une collaboration étroite et durable avec les services d'urgence locaux. Ce concept peut reposer sur le soutien apporté par l'infrastructure de recherche en termes d'équipement, de formation et de personnel. Il pourra permettre d'accroître l'expertise et les compétences des services d'urgence locaux, de les doter d'équipements de pointe, d'augmenter le nombre de spécialistes dans la région et de renforcer la coopération et la coordination entre les différents services d'urgence. Ce bénéfice potentiel a une valeur non actualisée d'environ 30 millions de francs suisses et représente une valeur actualisée d'environ 16 millions de francs

suisses. Puisqu'il repose sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un concept et d'un plan de sécurité au niveau territorial, ce qui peut nécessiter beaucoup de temps et d'ajustements pour rendre le concept réalisable, le bénéfice n'est pas inclus dans le calcul de la valeur actuelle nette de base.

En outre, deux autres catégories de bénéfices décrites dans les sections suivantes n'ont pas été prises en compte de manière adéquate dans la formule globale de détermination de la valeur actuelle nette du projet : la création économique de valeur ajoutée et la valeur du bien public.

### *Analyse complémentaire de la valeur économique ajoutée*

En plus de son impact socio-économique, la valeur économique ajoutée a été estimée en analysant les liens économiques (indirects, directs et induits) pendant toute la période de 30 ans couvrant la conception, la construction et la phase d'exploitation du FCC-ee à l'aide de la méthodologie du tableau des entrées-sorties[243]. L'étude a estimé les effets sur l'économie et l'emploi liés à la construction et à l'exploitation de la nouvelle infrastructure de recherche. Ces effets ne sont pas inclus dans l'analyse incrémentale des coûts et des bénéfices car ils ne représentent pas la création de nouveaux biens et services économiques en dehors de l'infrastructure de recherche, mais conduisent à une valeur économique ajoutée en raison de l'activation de nombreux secteurs économiques dans le cadre des activités liées à l'infrastructure de recherche.

Ces effets découlent principalement de la construction des structures civiles, des accélérateurs de particules et des collisionneurs, des infrastructures techniques, des expériences, des frais d'exploitation et de la consommation liée au personnel impliqué. Cette analyse économique n'a été réalisée que pour une infrastructure comportant deux expériences et n'a pas été actualisée en fonction de la base de référence actuelle.

En utilisant un modèle économique d'entrées-sorties, les dépenses cumulées d'environ 21 milliards de francs suisses sur une période de 30 ans de construction et d'exploitation de la recherche pourraient être liées à quelque 800 000 personnes-années d'opportunités d'emploi, ce qui correspond à près de 30 000 emplois par an par le biais de chaînes de valeur ajoutée mondiales. Outre les quelque 6 000 emplois directement liés aux projets dans les domaines de la science, de l'ingénierie, de l'administration et de la gestion, plus de 20 000 emplois sont nécessaires pour fournir les biens et les services nécessaires à la construction et à l'exploitation. Les pays hôtes, la Suisse et la France, et en particulier le canton de Genève et les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie, pourront bénéficier grandement des dépenses liées à la phase d'exploitation. Au total, environ 13000 emplois seront pourvus ou créés chaque année en moyenne en France et en Suisse.

Un investissement initial de 12,1 milliards de francs suisses lié à la construction génère directement une valeur ajoutée globale de 5,4 milliards de francs suisses, générant près de 80 000 personnes-années d'emploi, soit plus de 8 000 emplois par an sur une période d'investissement de dix ans. Si l'on inclut les effets indirects dans le processus de production, la valeur ajoutée liée à l'investissement s'élève à 11,6 milliards de francs suisses, entraînant environ 180000 années-personnes d'emploi, soit 18000 emplois par an pendant la période d'investissement. En élargissant les frontières du système pour inclure l'amortissement (c'est-à-dire le capital social que les entreprises doivent constituer ou reconstituer pour faire face à la production liée au FCC), la valeur ajoutée liée au FCC s'élève à plus de 14 milliards de francs suisses et génère plus de 230 000 années-personnes d'opportunités d'emploi, soit 23 000 emplois par an au cours de la phase d'investissement. Tous les types d'entreprises, grandes, moyennes et petites, peuvent bénéficier de cette valeur ajoutée. Les pays qui peuvent bénéficier de ces bénéfices dépendent de la stratégie d'approvisionnement choisie. C'est le secteur de la construction qui en bénéficie le plus, puisque près de la moitié du volume d'investissement peut être attribuée au génie civil. Cependant, tout au long du cycle, sa part diminue régulièrement et celle de la plupart des autres secteurs augmente.

L'exploitation du FCC génère de la valeur ajoutée par le paiement des salaires et des cotisations de sécurité sociale et par l'amortissement de l'investissement. Aucun excédent d'exploitation (net) n'est pris en compte puisque le CERN, organisme de recherche purement scientifique, n'est pas à but lucratif. La valeur ajoutée directe pendant la phase d'exploitation est estimée à environ 455 millions de francs suisses par an. Pour fonctionner, un ensemble d'intrants (biens intermédiaires et services) est nécessaire, dont l'acquisition offrira aux entreprises appropriées des possibilités de vente et d'emploi et générera ainsi une valeur ajoutée indirecte d'environ 165 millions de francs suisses par an. La valeur ajoutée directe, indirecte et induite pendant la phase d'exploitation, qui s'élève à plus de 620 millions de francs suisses par an, permet de financer 8 400 emplois, la plupart en France et en Suisse. La mise en place et la fourniture de sources d'énergie renouvelable pour le fonctionnement de l'infrastructure de recherche augmenterait la valeur ajoutée de l'Europe de 500 millions de francs suisses supplémentaires, garantissant 7 400 personnes-années d'emploi en Europe. Par secteur économique, la structure des effets de la consommation est nettement différente des effets des dépenses d'investissement et de fonctionnement : les activités immobilières, le commerce (de détail), les services personnels et le secteur de l'hôtellerie et de la restauration sont les principaux bénéficiaires de la consommation des employés liés aux projets.

La limite inférieure des dépenses touristiques imputables au projet dans l'ensemble de la région de Genève est d'au moins 130 millions de francs suisses par an. La Suisse et la France se partagent la plus grande partie du total des effets, avec environ 1 700 emplois liés aux seuls visiteurs. – Cinq cents autres emplois sont européens, le reste, soit environ 600, sont pourvus en dehors de l'Europe. Globalement, les effets du tourisme soutiendraient environ 2 700 emplois.

La consommation d'énergie électrique dans le cadre de contrats d'achat d'électricité à long terme générerait une valeur ajoutée directe d'environ 200 millions de francs suisses, liée à 3 500 personnes-années d'emploi, en raison des activités de renforcement des capacités. Si l'on inclut les intrants intermédiaires et les investissements nécessaires à la production et à l'installation des équipements, la contribution à la valeur ajoutée de l'Europe s'élève à 510 millions de francs suisses, ce qui représente 7 400 personnes-années d'emploi en Europe. Les effets de valeur ajoutée au niveau mondial liés au secteur de l'approvisionnement en électricité s'élèvent à 620 millions de francs suisses ou à 11 600 personnes-années d'emploi.

Ces chiffres doivent être interprétés avec prudence. Ce qui est encore plus important, c'est que les emplois indirects se déduisent dans l'hypothèse d'un régime permanent. Les estimations ne projettent pas dans le futur les principales variables économiques (les taux de change, les niveaux de prix et la productivité étant les plus importants). Par conséquent, les effets sont estimés comme si le FCC avait été construit et fonctionnait à l'heure actuelle. – Cela ne doit pas être considéré comme une lacune, car cela permet aux décideurs de saisir plus facilement les effets des estimations en se référant à un cadre de référence familier : l'économie telle qu'elle est aujourd'hui. Les chiffres relatifs à la valeur ajoutée qui en résultent sont moins compromis par cette simplification, car il est impossible de prévoir l'évolution des principaux paramètres de performance économique à l'échelle d'un projet de FCC dont la construction commence au milieu des années 2030 et qui entre en service à la fin des années 2040. Les chiffres de l'emploi liés aux dépenses représentent des limites supérieures fiables puisque la productivité du travail devrait augmenter. Malgré les conditions économiques changeantes, le FCC restera ce qu'il est aujourd'hui : une entreprise majeure pour la communauté scientifique et la société dans son ensemble, avec des impacts scientifiques, technologiques, techniques et économiques probablement significatifs.

L'analyse montre que les coûts qu'un projet comme le FCC implique sont également liés à des impacts économiques tangibles, en termes d'opportunités de vente pour les entreprises et d'opportunités d'emploi pour les scientifiques et les non-scientifiques. En se concentrant uniquement sur un ensemble de mécanismes de transmission, ces résultats constituent une limite inférieure pour les effets économiques attendus. Par conséquent, même si les liens économiques étroits de la construction et de l'exploitation ne sont pas plus importants que ce que l'on pourrait attendre d'un projet de cette taille, le potentiel de retombées dans des domaines technologiques et commerciaux sans rapport avec le projet est certainement beaucoup plus marqué : par exemple, seuls quelques projets sont capables de susciter un attrait touristique, sans parler des potentiels technologique et scientifique.

Par ailleurs, en estimant la structure régionale des effets liés à la construction et à l'exploitation du FCC, l'analyse a montré que le lien entre la contribution au CERN, les contrats directs et les bénéfices indirects n'est pas toujours évident. Par exemple, on estime que la Chine et les États-Unis, qui ne sont pas membres du CERN, bénéficieront de retombées économiques considérables en raison de leur rôle prépondérant dans les chaînes de valeur mondiales. Ces informations pourraient servir de base à des négociations entre le CERN et des pays comme la Chine en vue d'intensifier et de formaliser des coopérations plus étroites à l'avenir, ce qui serait bénéfique pour les deux parties.

### ***Valeur du bien public***

Pour évaluer le volume des bénéfices sociétaux, une enquête approfondie a été menée auprès d'environ 10 500 personnes dans neuf pays [177], y compris des États membres et non membres du CERN susceptibles de contribuer au projet de futur collisionneur de particules du CERN. L'enquête visait à évaluer la notoriété du CERN et de ses activités de recherche, la valeur perçue par le public d'une nouvelle infrastructure de recherche telle que le FCC, et à comparer cette valeur monétaire aux contributions annuelles par habitant versées par les États membres du CERN.

La valeur du bien public ne doit pas être intégrée dans l'estimation de la valeur actuelle nette du projet, puisque la valeur perçue du projet, c'est-à-dire la valeur que les contribuables associent au projet, est orthogonale aux bénéfices supplémentaires réellement estimés. Mesurée par le consentement à payer, la valeur du bien public dépend également de la connaissance du projet, de ses coûts, de ses facteurs externes négatifs et de ses bénéfices incrémentaux probables. Par conséquent, sa valeur est affectée par certains biais cognitifs, comme, par exemple un biais d'information. La présence de tels biais n'est pas négative et ne peut être évitée. Ces biais font partie du mécanisme qui permet aux gens d'associer une valeur à un actif auquel ils n'ont pas directement accès.

Les résultats indiquent que 41 % des personnes interrogées connaissent le CERN et sa mission, ce qui, bien que cette notoriété soit inférieure à d'autres organisations internationales comme la NASA, reste globalement positif. Plus de 80 % des personnes interrogées estiment que la recherche scientifique au CERN fait progresser notre compréhension de l'univers et contribue à améliorer la qualité de la vie. La volonté hypothétique de participer financièrement au développement du nouveau projet d'infrastructure de recherche a été évaluée, révélant des répartitions variables selon les pays. Les valeurs médianes vont de 2 francs suisses par personne et par an en France à 20 francs suisses en Suisse, ces deux pays étant membres du CERN. Pour les pays tiers, le consentement à payer (CAP) médian varie de zéro au Japon à 24 aux États-Unis (bien que la valeur moyenne pour le Japon soit de 10 francs suisses, ce qui signifie qu'une fraction significative de la population adulte japonaise accorde de l'importance à ce type de recherche scientifique). Le bénéfice a été estimé en multipliant le CAP annuel estimé par habitant par une population adulte totale d'environ 380 millions de personnes sur 30 ans dans les États membres du CERN, en commençant par les premiers investissements pertinents.

Dans tous les cas observés, la valeur publique perçue dans les États membres du CERN est supérieure au budget opérationnel annuel du CERN, qui 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, soit environ 5 euros par contribuable et par an. Le CAP total estimé pour un projet de futur collisionneur au CERN dépasse les coûts totaux estimés du FCC d'un facteur 20 et ses bénéfices quantifiables de plus de 11 fois.

Ces résultats étayent solidement la conclusion selon laquelle la décision d'investir dans un programme de futur collisionneur de particules au CERN peut être considérée comme justifiée d'un point de vue sociétal, étant donné que les personnes susceptibles de financer l'effort en question lui attribuent une valeur supérieure à son coût total.

#### 4.8.7. Conclusions

L'analyse de l'impact socio-économique repose sur une évaluation sociale des coûts et des bénéfices menée sur la première phase du programme FCC, qui s'étend sur une période de 40 ans depuis la décision d'investissement financier jusqu'à la fin de l'exploitation. Le FCC-ee a quantifié les coûts, les facteurs externes négatifs et les potentiels de bénéfices prudents et plus larges dans différents domaines. Des coûts d'environ 20 milliards de francs suisses actualisés et des facteurs externes négatifs d'environ 354 millions de francs suisses peuvent être comparés aux bénéfices que cette infrastructure de recherche peut générer. La valeur actuelle totale des principaux bénéfices socio-économiques valorisés associés aux infrastructures de recherche du FCC-ee a été estimée de manière prudente à une valeur actualisée de 24 milliards de francs suisses. Les bénéfices supplémentaires élargis s'élèvent à environ 7 milliards de francs suisses actualisés. Les infrastructures représentent une valeur résiduelle d'environ 2,5 milliards de francs suisses pour un collisionneur de hadrons ultérieur, mis à disposition à titre de « cadeau » pour ce deuxième projet.

L'estimation prudente de la valeur actuelle nette (VAN) du projet sur l'ensemble de sa période d'observation est d'environ 4 milliards de francs suisses, ce qui donne un ratio bénéfices/coûts positif d'environ 1,20. L'inclusion des valeurs d'actif résiduelles porte la VAN à environ 6,5 milliards de francs suisses. Si l'on étend les estimations à un plus grand nombre de bénéfices potentiels, le projet offre la possibilité d'atteindre une VAN encore plus élevée. Toutefois, pour atteindre une telle performance, il faut concevoir, planifier et mettre en œuvre les bénéfices escomptés, ainsi que prendre des mesures assorties d'engagements et assurer une surveillance et un suivi continu au niveau du CERN et de la collaboration internationale. Une gestion des risques et un contrôle des coûts appropriés doivent être mis en place pour gérer les coûts et les facteurs externes négatifs.

Les coûts ont été basés sur les estimations des coûts d'investissement actuellement disponibles et sur l'expérience de l'exploitation du complexe d'accélérateurs de particules et de collisionneurs du CERN au cours des deux dernières décennies. Les facteurs externes négatifs les plus notables ont été identifiés, quantifiés et valorisés à l'aide de méthodologies d'analyse du cycle de vie et de lignes directrices au niveau européen pour l'évaluation des impacts socio-économiques au sens large et l'évaluation des projets. Les valeurs des coûts ont été ajustées en fonction des taux de change et de la valeur temporelle, avec 2024 comme année de référence.

Les bénéfices ont toujours été évalués selon une méthodologie prudente, fondée sur la compréhension actuelle du projet, les enseignements tirés d'infrastructures de recherche analogues antérieures et les analyses d'impacts socio-économiques du LHC [193] et du HL-LHC [119] qui ont été réalisées en tant que précurseurs, anticipant ainsi la nécessité de produire une étude d'impacts socio-économiques du FCC.

En outre, les données récentes collectées entre 2020 et 2024 ont joué un rôle crucial dans l'élaboration de ces estimations. Pour garantir une perspective globale, les efforts de collecte de données ont porté sur plus de 16000 personnes au moyen d'enquêtes en ligne. Ce groupe diversifié comprenait des membres du public, des visiteurs du CERN, des utilisateurs de plateformes telles que Zenodo et Indico, ainsi que d'anciens chercheurs.

Dans un scénario probable entre les hypothèses optimistes et pessimistes, les bénéfices quantifiés dépassent les coûts totaux associés à la conception, à la construction et à l'exploitation du FCC-ee, ce qui se traduit par un impact socio-économique positif net pour le projet.

Si une décision d'investissement financier est prise pour poursuivre un projet de construction, il sera nécessaire d'actualiser l'évaluation au cours des prochaines années et de rassembler tous les documents nécessaires pour obtenir le financement de la part des pays participants et les autorisations de la part des États hôtes.

L'approche utilisée dans cette analyse exclut intentionnellement et complètement les impacts incertains et imprévisibles sur la société de l'accroissement des connaissances généré par la mission scientifique, en raison de leur imprévisibilité intrinsèque.

L'évaluation de la valeur du bien public de l'infrastructure de recherche pour le public donne un aperçu des bénéfices globaux d'un projet de futur collisionneur de particules au CERN pour la société, mesurés selon le point de vue du public et son consentement à contribuer financièrement à la mise en œuvre d'un projet. Le

fait que la valeur perçue d'un projet de future infrastructure de recherche dépasse les coûts du FCC est une preuve importante que le public accorde à la recherche scientifique une valeur supérieure à son coût réel et contribue ainsi à l'obtention de la licence sociale d'exploitation (Social Licence to Operate - SLO).

Bien qu'il soit nécessaire de l'affiner, cette analyse sert d'outil pour éclairer la prise de décision, optimiser l'engagement des utilisateurs, identifier et atténuer les risques et améliorer les conditions d'acceptation sociale du projet FCC-ee. Les résultats soulignent que le projet FCC-ee promet des retombées positives non seulement pour la communauté scientifique, mais aussi pour l'ensemble de la société, contribuant ainsi à la viabilité à long terme du projet.

## 4.9. Retours sur investissement pour les pays participants

### 4.9.1. Vue d'ensemble

Plusieurs organismes d'analyse économique (par exemple, LSE [180], WIFO [244]) ont été consultés afin d'analyser comment les pays potentiellement participants peuvent augmenter la probabilité de bénéficier d'une contribution financière au projet. Des exemples de telles propositions sont rassemblés dans cette section.

Les experts s'accordent à dire que les organisations internationales, y compris le CERN, génèrent des impacts économiques et sociétaux significatifs au-delà de leurs activités principales dans leurs pays hôtes et dans les pays participants.

Un concept existant pour assurer un retour sur investissement continu aux pays participants est l'approche de l'agent de liaison internationale (ALI) pour intégrer les entreprises nationales dans les processus de passation de marchés de l'organisation internationale. Cette approche a été étudiée par des économistes, qui ont constaté que pour un futur projet à grande échelle, une approche plus structurée et plus complète pourrait conduire à de meilleurs résultats pour les pays participants.

Les mesures recommandées [180] pour assurer de bons retours sur investissement aux pays financièrement participants tournent principalement autour de trois thèmes :

1. Bénéfices pour l'industrie ;
2. Bénéfices de formation ;
3. Bénéfices culturels.

L'un des moyens d'assurer de bons retours sur investissement consiste à accroître la durabilité de la diffusion des bénéfices liés à la passation des marchés, en permettant à un plus grand nombre d'entreprises dans les différentes régions de participer avec succès aux futurs marchés publics liés aux collisionneurs et d'exploiter la chaîne de valeur créée par les contrats. Cela concerne :

- l'uniformisation des règles du jeu afin que davantage d'entreprises puissent participer à la procédure de gestion des achats ;
- le soutien aux PME, car ce sont les entreprises les plus susceptibles d'être confrontées à des obstacles dans le cadre de la procédure de passation des marchés ;
- l'intégration d'un plus grand nombre d'entreprises dans la chaîne de valeur des marchés publics ;
- la décarbonisation de la chaîne d'approvisionnement par le biais de contrats globaux d'alimentation en énergie ou de contrats d'achat d'électricité (CAE) et de communautés énergétiques qui permettent de mettre en commun des contrats d'énergie renouvelable pour des groupes de fournisseurs et des marchés plus importants.

Un autre levier consiste à favoriser la circulation des cerveaux. Le CERN est un lieu d'étude et de travail attrayant pour des personnes du monde entier. Cependant, nombre de ces personnes talentueuses finissent par rester à l'étranger une fois leur participation au projet terminée, ce qui entraîne ce que l'on appelle souvent une fuite des cerveaux pour leur pays d'origine. Les politiques suivantes peuvent contribuer à faire en sorte que davantage d'endroits bénéficient de la formation du capital humain dans le cadre d'un processus vertueux de circulation des cerveaux :

- Comprendre les besoins locaux en matière de talents afin que les États membres et leurs régions puissent mieux cibler le rapatriement des personnes ;
- Attirer les anciens stagiaires du CERN grâce à des initiatives personnalisées ;
- Renforcer la connectivité afin que les régions d'origine et de destination bénéficient d'un développement du capital humain.

Un autre levier consiste à étendre les bénéfices du tourisme et à y associer davantage de régions. Grâce au nouveau Portail de la science, 350 000 à 400 000 personnes visitent le CERN chaque année. Cependant, la plupart des bénéfices touchent un petit périmètre géographique en Suisse et en France, où se trouve le CERN. L'un des moyens pour que davantage de régions puissent en tirer parti consiste à veiller à ce que le périmètre élargi du FCC bénéficie des visites sur place. D'autres développements pourront ensuite être réalisés pour faire du CERN une porte d'entrée pour le tourisme scientifique.

Les économistes ont élaboré des propositions qui peuvent être prises en compte lors de la phase de développement du projet afin d'aider les pays participants à tirer le meilleur parti des opportunités offertes par un nouveau projet d'envergure. Une possibilité pour un pays contributeur serait de mettre en place une organisation nationale dotée d'un personnel spécialisé qui viserait à développer les correspondances les plus adéquates entre les compétences et les intérêts du pays et le projet. Une telle activité va au-delà de la liaison industrielle classique. Elle vise à intégrer les écoles, les universités, les centres de recherche, les entreprises de toutes tailles et les agences nationales de financement par le biais de politiques de développement et d'actions concrètes dans le cadre du projet. Cela nécessite une connaissance approfondie du projet, en veillant à ce que le personnel de l'organisation soit impliqué à long terme pour pouvoir établir des liens durables et acquérir une connaissance complète du paysage des compétences et des capacités nationales. Les recettes directes provenant des marchés publics ne sont que la partie émergée d'un iceberg d'impacts potentiels. Les rendements à long terme peuvent dépasser de loin ceux des contrats directs. Cela concerne notamment :

- le rapatriement des personnes et l'acquisition de personnel hautement qualifié et formé dans le cadre du projet ;
- la formation des ressortissants à tous les niveaux pour des périodes limitées à l'étranger ;
- l'utilisation du projet comme une usine pilote, la démonstration de technologies, leur commercialisation et la pénétration de nouveaux marchés ;
- la construction de chaînes des valeurs transnationales durables, en utilisant le projet comme moteur de l'innovation nationale et en tirant parti des fonds nationaux ;
- la mise en réseau d'entreprises de tailles différentes ;
- le décloisonnement de la recherche en réunissant des universités et des instituts de différentes disciplines autour d'un même projet scientifique.

L'ensemble du concept vise à surmonter les asymétries d'informations qui ne privilégient qu'un petit nombre d'entreprises et d'universités bénéficiant de liens historiques leur permettant de profiter des projets scientifiques d'envergure du CERN.

Tous les efforts visant à planifier un bon retour sur investissement pour les pays participant financièrement reposent sur une analyse systématique, un suivi et une évaluation régulière des performances socio-économiques permettant d'adapter le projet. Il existe suffisamment de preuves des bénéfices socio-économiques des activités du CERN par différentes voies, mais il y a encore des lacunes dans la compréhension de ce qui est nécessaire pour accroître et maintenir ces effets. Faire de la collecte et de l'évaluation des données une partie intégrante du projet FCC peut aider à définir les objectifs de la collecte de données et les approches méthodologiques pour en mesurer les effets.

Les recommandations documentées par LSE et WIFO pour assurer de bons retours sur investissement pour les pays participants fournissent des exemples spécifiques et tangibles de cas de réussite pour chaque recommandation politique basée sur des initiatives passées. Un avantage significatif de plusieurs propositions réside dans leur caractère autonome : elles peuvent être mises en œuvre individuellement. Nombre d'entre elles peuvent également être mises en œuvre par des pays et des régions de manière indépendante, ce qui leur permet de tirer profit d'un projet sans avoir à impliquer d'autres pays participants.

#### **4.9.2. Opportunités d'emploi au niveau local**

Une future infrastructure de recherche avec un développement territorial supplémentaire peut conduire à des bénéfices territoriaux à travers l'emploi direct, la fourniture de biens et de services, les opportunités d'emploi indirectes et induites dans un périmètre plus large que celui des activités actuelles du CERN. Les impacts indirects et induits ne concernent pas seulement la chaîne de valeur des biens et services fournis au niveau régional, c'est-à-dire les autres fournisseurs de matériaux et de services pour satisfaire les besoins des fournisseurs du FCC et les emplois satisfaisant aux besoins liés à la présence du personnel associé aux activités de construction et d'exploitation du FCC aux environs des sites de surface. La fédération de certaines activités liées à la construction et à l'exploitation, c'est-à-dire les prestations au service des infrastructures de recherche à certains endroits, peut également créer des opportunités d'emploi nouvelles et durables au plan territorial. Ces services comprennent, par exemple, la planification du projet de construction, la gestion du projet, la préparation et l'exploitation du site de construction et les services commerciaux (par exemple, la comptabilité, les ressources humaines, les technologies de l'information, la gestion des parcelles de terrain). Les services de la phase d'exploitation comprennent, par exemple, la surveillance et la sécurité des sites de surface, les services d'exploitation technique, la maintenance technique, l'exploitation des installations de visite et les services commerciaux généraux, comme c'est le cas pour la phase de construction.

Les potentiels d'impact économique, en particulier les effets liés à l'emploi, sont encore en cours d'étude et dépendent des fournitures et des services considérés, ainsi que des lieux où ils pourront se concrétiser. L'analyse préliminaire fait état d'opportunités de l'ordre de 1 000 à 2 000 emplois sur une période prolongée jusqu'à la fin du siècle. Les effets sont principalement liés aux dépenses des ménages dont ces personnes font partie, représentant par an environ 219 millions d'euros pour la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les avantages directs liés à la fiscalité sont estimés entre 2,6 (au plan régional) et 3,3 (au plan national) millions d'euros par an. Les impacts fiscaux indirects et induits se situent entre 3,6 (au plan régional) et 4,1 (au plan national) millions d'euros. Les principaux secteurs qui bénéficieraient de ces avantages sont le commerce, le logement, les travaux de construction spécialisés, le génie civil et les travaux publics, le commerce, l'industrie manufacturière et les équipements spécialisés, la transformation des matériaux, les services financiers et d'assurance, la transformation chimique, la production et la distribution d'énergie, les biens et services culturels, la restauration et les télécommunications.

Ces résultats préliminaires sont à prendre avec beaucoup de précaution, car le scénario du projet, l'organisation de la construction et de l'exploitation sont à un stade très précoce et susceptibles d'évoluer.

#### **4.9.3. Opportunités de création d'impacts**

Les recommandations politiques suivantes sont des exemples tirés des études réalisées par des organisations de recherche économique indépendantes, visant à générer des retours sur investissement au plan régional dans le cadre d'un projet global.

- Les pays participants mettent en place des organisations nationales de soutien pour mettre en relation différents acteurs (entreprises, universités, centres de recherche, pôles d'innovation, agences nationales de financement) avec le nouveau projet de recherche afin d'obtenir un effet de levier aussi important que possible au-delà de la passation pure et simple d'un contrat :
- Piloter les technologies ;
- Commercialiser les technologies ;
- Former les personnes ;
- Exploiter les possibilités de recherche scientifique ;
- Obtenir un financement national pour les développements motivés par le nouveau projet ;
- Attirer des personnes hautement qualifiées et formées au moyen de salons de l'emploi ;
- Transférer les connaissances du projet aux universités et aux entreprises.
- Passer à une approche normalisée des appels d'offres, ce qui implique l'adoption de mots-clés et de codes normalisés et la publication des appels d'offres auprès d'un public plus large, par exemple dans le supplément

au Journal officiel de l'Union européenne (TED). Cela permet de réduire les coûts de recherche pour les entreprises et d'augmenter les opportunités pour les petites et moyennes entreprises (PME).

- Utiliser le système de code international standard NACE (La Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne (NACE) est le système de classification standard industriel utilisé dans l'Union européenne.) pour s'assurer que les entreprises reçoivent des demandes de participation qui correspondent bien à leurs compétences et pour s'assurer que les pays peuvent faire correspondre efficacement leurs spécialisations aux besoins du projet.
- Mettre en place des centres de soutien spécialisés au sein des bureaux des associations professionnelles locales dans les régions où sont concentrés des groupes d'entreprises actives dans les secteurs concernés par le projet. Ces centres offriront un soutien spécialisé aux PME régionales qui souhaitent s'engager dans le processus de passation de marchés.
- Dégrouper les grands contrats afin d'accroître la possibilité pour les PME de participer au processus de passation des marchés tout en renforçant la robustesse de la chaîne d'approvisionnement.
- Réserver aux PME les contrats de moindre valeur, si elles satisfont aux critères de compétitivité en matière de qualité et de prix.
- Réaliser une cartographie de la chaîne de valeur pour les différentes technologies requises afin de comprendre la distribution spatiale des activités de passation de marchés et, pour les régions, afin de mieux comprendre les opportunités de compétitivité locale ;
- Créer des unités de contenu local (LCU) en tant qu'organes ou fonctions distincts à développer au sein des agences de développement régional existantes dans les régions où se trouvent d'importants fournisseurs du CERN. Elles peuvent également être établies et coordonnées directement par le CERN en tant qu'« unité d'accélération des impacts économiques locaux ».
- Créer des alliances entre les régions ayant des secteurs pertinents pour le projet afin de faciliter la collaboration interrégionale et le partage des connaissances.
- Le CERN pourra faciliter la conclusion de contrats d'achat d'électricité (CAE) globaux en agissant en tant que locataire principal ou en encourageant la création de consortiums. Il est également possible de créer des contrats d'alimentation en énergie ou des CAE pour des marchés plus importants et des groupes de fournisseurs dans le cadre d'approvisionnements spécifiques. Par ailleurs, les communautés énergétiques qui existent dans d'autres pays constituent un exemple efficace d'obtention d'électricité à des fins de production et de fabrication à partir de sources d'énergie renouvelables. Certaines conditions peuvent être incluses dans les exigences en matière de passation de marchés.
- Les régions identifiées comme Fournisseurs de talents devraient procéder à une analyse complète du type de compétences que la région doit attirer, en mettant l'accent sur le profil des talents locaux qui ont quitté leur région pour rejoindre le CERN.
- Créer et promouvoir des opportunités au moyen de subventions et de bourses destinées aux personnes hautement qualifiées afin qu'elles s'installent dans leur région.
- Offrir des incitations au rapatriement dans leur région d'origine aux personnes qui ont fait un séjour au CERN.
- S'engager avec le personnel du CERN et les anciens stagiaires à l'étranger, par des programmes d'échange de connaissances et d'entrepreneuriat, des programmes de mentorat et des distinctions.
- Élaborer, en collaboration avec les offices de tourisme et d'autres centres de recherche, des circuits touristiques scientifiques qui présentent des attractions scientifiques supplémentaires dans toute l'Europe et des pôles technologiques combinés à d'autres activités.
- Établir un flux de financement pour l'évaluation de l'impact socio-économique et la collecte de données dès le début du projet FCC.
- Exploiter un portail de données ouvertes qui incite les spécialistes des sciences sociales à utiliser le CERN pour continuer à évaluer l'impact socio-économique de l'investissement dans le domaine scientifique.

#### **4.10. Exigences et contraintes pour une phase préparatoire**

La phase ultérieure de conception et de préparation exige une conception plus détaillée des infrastructures techniques sur la base d'exigences systématiquement identifiées et correctement structurées et documentées pour le collisionneur de particules et les expériences. Cette documentation doit être utilisée pour réaliser une ACV conformément aux normes et aux bonnes pratiques déjà utilisées pour l'analyse de l'empreinte de la construction.

En raison de l'absence de conception détaillée, des longues échelles de temps et de la nécessité de développer un scénario d'approvisionnement particulier pour une étude, une approche de plus haut niveau pourra être adoptée pour l'estimation des effets potentiels des accélérateurs de particules et des expériences sur le climat. Il faut cependant veiller à éviter une approche trop simpliste en se concentrant uniquement sur l'analyse générique de l'empreinte carbone des matériaux supposés. Dans la mesure du possible, des systèmes complets doivent être envisagés et, lorsque cela n'est pas possible, des hypothèses raisonnables sur les processus de fabrication, d'assemblage et d'installation doivent être formulées et incluses dans le processus d'analyse.

En ce qui concerne l'utilisation des énergies renouvelables, il est important de mettre en place une équipe chargée des achats d'énergie, en mesure de préparer l'élaboration de contrats d'approvisionnement ou de contrats d'achat. L'équipe doit élaborer une stratégie et préparer la mise en place d'un portefeuille d'approvisionnement en énergie en vue des phases d'essai, de mise en service et d'exploitation. La préparation de l'approvisionnement en énergie pour la phase de construction doit être entamée dès que possible. Un délai de dix ans est considéré comme adéquat pour le processus de préparation et d'acquisition des énergies renouvelables pour la phase d'exploitation.

Les possibilités d'approvisionnement en chaleur fatale et de réduction de la consommation d'eau dépendent de la volonté des parties prenantes nationales de mettre en place des réseaux de chauffage urbain et de travailler avec le CERN sur le traitement de l'eau et l'approvisionnement en eau traitée au niveau régional. Par conséquent, des conceptions locales, des plans d'exploitation et des projets pilotes spécifiques devront être mis en place avant que l'infrastructure de recherche ne soit supposée entrer en phase d'exploitation. Un délai de 20 ans est suffisant, compte tenu des autorisations, du financement, de la mise en place des opérateurs locaux et du raccordement des consommateurs sur le réseau de chauffage urbain.

En ce qui concerne l'intégration paysagère, l'élaboration de projets de renaturation, l'utilisation des matériaux excavés et la conception d'actions de compensation, il faut suffisamment de temps pour travailler avec les parties prenantes locales et régionales. Cela nécessite également l'allocation de ressources internes au projet pour établir des contrats avec des partenaires externes et pour travailler avec eux, ainsi qu'avec les communautés et l'administration publique. Plusieurs années devraient être consacrées au renforcement de ces capacités. Il est donc nécessaire d'établir un calendrier permettant de travailler avec les parties prenantes locales et régionales de manière flexible, en évitant d'accumuler trop de pression. En effet, une telle pression peut nuire à la conclusion d'accords mutuels et à l'obtention d'un consensus sur les projets de développement territorial et la génération de bénéfices socio-économiques à tous les niveaux.

#### 4.11. Recommandations pour un projet de phase préparatoire

Cette section présente une série de recommandations issues des travaux présentés dans cette analyse. Leur objectif est de garantir que les bénéfices pourront être contrôlés et faire l'objet de rapports réguliers afin que les résultats actualisés puissent être intégrés dans les phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure.

L'étude socio-économique a montré qu'il est possible d'atteindre un seuil de rentabilité des coûts et des bénéfices grâce à l'infrastructure de recherche FCC-ee, avec les voies d'impact documentées jusqu'à présent. Toutefois, le potentiel ne peut être pleinement exploité que si un suivi continu des impacts socio-économiques est intégré aux phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure. Pour atteindre cet objectif, le groupe d'experts en économie (CSIL, LSE, WIFO, Université de Milan, Université économique de Vienne) qui a participé aux études socio-économiques jusqu'à présent a formulé neuf recommandations à l'attention des maîtres d'ouvrage du FCC.

1. Affecter des ressources humaines et matérielles adéquates à l'identification, à la conception, à la planification, à la mise en œuvre, au suivi et à l'évaluation de l'impact, afin d'exploiter pleinement les potentiels d'impact et de faire du FCC une entreprise durable sur le plan socio-économique. Le personnel doit être habilité à faire en sorte que les résultats de l'évaluation de l'impact et les recommandations relatives à la génération d'impact soient pris en compte dans la conception, le cas échéant, qu'ils soient mis en œuvre et qu'un suivi continu et systématique en soit assuré. En outre, l'analyse doit être réalisée avec l'aide de tous les membres du projet participant au projet. Cela implique que l'évaluation de l'impact socio-économique soit mise en œuvre dans l'ensemble de l'organisation, avec la participation directe du plus haut niveau de gestion et en rendant compte directement à la principale partie prenante du CERN, le Conseil. Cette approche devrait garantir la durabilité et l'efficacité du processus et contribuer à améliorer l'acceptation du projet par les pays qui y participent financièrement.
2. Encourager les participants à publier leurs travaux scientifiques et techniques par la Voie dorée (ou « Gold Open Access ») (par opposition à l'auto-édition) et par des diffuseurs réputés (par opposition au dépôt d'informations sur des serveurs de prépublication uniquement). Cela permet d'identifier correctement les travaux à des fins de suivi et d'augmenter la probabilité qu'ils soient adoptés. Cette étude d'évaluation de l'impact socio-économique a révélé des difficultés à identifier tous les résultats scientifiques associés aux activités de l'infrastructure de recherche. Il est essentiel de suivre la production scientifique des chercheurs impliqués dans les expériences et de surveiller les citations dans les articles et autres produits scientifiques. Cependant, les résultats scientifiques dépourvus d'identifiants numériques uniques et de références de citation, comme c'est souvent le cas pour les actes d'ateliers et les présentations disponibles sur des plateformes telles qu'Indico, développée par le CERN [245], ne peuvent pas être correctement identifiés et pris en compte pour l'évaluation socio-économique. Ces types de résultats doivent, dans la mesure du possible, être remplacés ou complétés par des rapports ou des documents exploitables. L'établissement de partenariats stratégiques avec des éditeurs de premier plan, comme l'illustre le projet SCOAP3 [246] est une approche convenable pour garantir la présence de publications exploitables. Les plateformes de libre accès utilisées pour la diffusion pourraient intégrer le suivi des téléchargements, des citations et des références si elles n'offrent pas déjà ces fonctions (par exemple, Zenodo[247] et ArXiv [248] n'offrent pas ces fonctions à l'heure actuelle). En outre, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étendre le contrôle et le suivi du contenu scientifique au-delà des articles et des présentations scientifiques et techniques, afin d'inclure les livres et de mieux comprendre l'assimilation sociétale des connaissances acquises dans le cadre du programme FCC.
3. Prévoir un cadre pour suivre le mouvement des personnes après leur départ du projet, afin de faciliter l'analyse de l'évolution future de leur carrière. Toute personne contribuant au projet pendant une durée minimale devrait être encouragée, sur une base volontaire, à s'engager dans un programme de suivi complet. Grâce à des mécanismes permettant de reprendre contact périodiquement avec ces personnes, cette initiative impliquerait un suivi à long terme et la collecte périodique d'un ensemble d'informations de base concernant leur situation professionnelle actuelle.
4. Pour garantir une analyse efficace des retombées industrielles générées au cours de la mise en œuvre

du projet, il convient d'intégrer un suivi systématique des impacts économiques supplémentaires sur les fournisseurs résultant des actions de passation de marchés sur des périodes pluriannuelles. Étant donné que ces effets peuvent ne pas se manifester immédiatement et se prolonger au-delà de la durée du marché public, il est essentiel d'obtenir un retour d'information de la part des entreprises concernées. Cela nécessite la mise en place d'un cadre complet de suivi des marchés publics en faveur d'un engagement continu. Ce cadre devrait comprendre des dispositions permettant de stocker des informations sur les personnes initialement impliquées dans le contrat, afin de permettre un suivi périodique après la conclusion du contrat. En outre, il devrait faciliter la collecte d'informations essentielles concernant les retombées pour l'entreprise de l'expérience de passation de marchés avec le CERN. Cela peut se faire par le biais de mécanismes tels que de courtes enquêtes en ligne conçues pour recueillir des données pertinentes. En mettant en œuvre cette approche, le programme FCC peut obtenir des informations précieuses sur l'impact économique à long terme de ses activités de passation de marchés, ce qui favorisera l'amélioration continue et renforcera la collaboration avec les partenaires industriels.

5. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont été identifiées comme une voie d'impact clé qui devra être mieux exploitée par des actions de transmission ciblées à la société, accompagnées d'un suivi systématique de leur adoption. Le CERN et le FCC représentent un environnement unique au monde pour le développement de logiciels et de plateformes destinés à répondre aux besoins des coopérations mondiales, qui sont également très demandés dans les secteurs sociétaux et industriels. En identifiant les exigences spécifiques de ces coopérations et en lançant des projets de développement spécifiques, il est possible de créer un potentiel d'adoption généralisée au-delà du projet FCC. Il faut citer, par exemple la gestion collaborative d'événements, la création de documents, la communication (à la fois individuelle et collective), 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. Le CERN et les États membres devront veiller à ce que les technologies développées soient accessibles gratuitement aux utilisateurs en dehors de la communauté de la physique des hautes énergies et de la physique des particules, tout en garantissant la maintenance et l'amélioration à long terme. Pour cela, il faut que les logiciels et les outils soient disponibles sur des plateformes qui permettent de suivre le téléchargement et l'installation. Le manque de ces données a été identifié comme l'un des facteurs limitant l'estimation précise de l'impact des TIC.
6. En ce qui concerne l'impact des entreprises dérivées, il est nécessaire d'établir une méthode systématique de suivi des entreprises fondées par d'anciens participants au programme FCC, de suivre leur évolution dans le temps et d'évaluer leur valeur économique. La création de nouvelles entreprises exploitant les connaissances acquises dans le cadre du programme FCC représente un bénéfice sociétal important. Notamment, les entreprises dérivées résultent souvent de l'amalgame des différentes compétences et expériences des participants plutôt que de l'exploitation directe d'une seule technologie sous licence. En particulier, les technologies développées dans le cadre de projets de R&D collaboratifs ne peuvent pas être attribuées au CERN seul et le CERN n'effectue pas de suivi des technologies des partenaires de collaboration. Toutefois, pour évaluer avec précision les bénéfices économiques et sociétaux générés, il est essentiel de mettre en place un mécanisme de suivi volontaire et systématique. Ce cadre de suivi devra faciliter une évaluation complète de l'impact des entreprises dérivées. Il pourra inclure la création d'une base de données centralisée pour enregistrer des informations sur les entreprises dérivées (telles que leurs fondateurs, le pays, le secteur industriel, les produits/services offerts), ainsi que la possibilité de les contacter périodiquement pour être tenu au courant des progrès de leurs entreprises.
7. L'étude a révélé l'importance des bénéfices économiques dus aux visiteurs sur place. Pour assurer un suivi durable de l'impact du tourisme sur le site, le CERN et la collaboration FCC devraient établir un cadre unifié pour collecter en permanence des données essentielles sur les visiteurs des centres d'exposition du CERN, des expériences et de tout autre site de visite pertinent. Un mécanisme de suivi systématique des visiteurs est en effet nécessaire pour rendre compte avec précision des effets des visiteurs sur le site. Les visiteurs devraient être invités à fournir un petit nombre d'informations de base, notamment leur pays d'origine, leur mode de transport jusqu'à Genève, l'objet principal de leur visite, la durée de leur séjour, leurs dépenses et leurs commentaires sur les expositions et les sites de visite (par exemple, leur niveau de satisfaction). En mettant en œuvre ce cadre de suivi, il sera possible de suivre et d'évaluer efficacement l'impact culturel des visiteurs sur le site, ainsi que

- d'améliorer continuellement l'expérience des visiteurs.
8. L'identification et la quantification des bénéfices potentiels pour l'environnement et le développement de projets spécifiques devraient être intensifiés. L'identification et l'analyse des bénéfices environnementaux sont importantes pour l'acceptabilité sociale et pour parvenir à un bilan net à zéro de l'activité de recherche scientifique pour la société. Cela nécessite la mise en place et l'habilitation d'experts en économie et en environnement lors de la prochaine phase de préparation du projet et une coopération renforcée avec les partenaires industriels et les services de l'État hôte, afin d'identifier de manière fiable les bénéfices et les coûts environnementaux potentiels associés au projet. Outre la création de sources d'énergie renouvelable, la réutilisation de la chaleur fatale et la réutilisation des matériaux excavés, d'autres possibilités peuvent être découvertes grâce à des recherches supplémentaires et à des discussions approfondies avec les parties prenantes du projet. Par exemple, les voies d'impact liées à l'utilisation de l'eau, à la gestion des terres, à la conservation de la biodiversité et aux infrastructures de transport doivent faire l'objet d'un examen approfondi. L'évaluation des impacts négatifs potentiels sur l'environnement est tout aussi importante. Il est essentiel de comprendre et d'atténuer les effets négatifs tels que la pollution pour obtenir des résultats durables et garantir une utilisation responsable des ressources naturelles.
  9. Le contrôle continu de ce que l'on appelle la « valeur du bien commun » a été identifié comme une approche appropriée pour valider les investissements par rapport aux attentes des bailleurs de fonds, qui sont en fin de compte les contribuables. Cette approche devrait être renforcée par des enquêtes menées dans tous les pays susceptibles d'être des bailleurs de fonds et répétées régulièrement afin d'améliorer notre compréhension de la manière dont l'acceptation sociale peut non seulement être maintenue mais aussi améliorée. Un cadre de rationalisation de ce processus a été développé dans le cadre de ce projet, ce qui permet de poursuivre l'activité avec des ressources supplémentaires marginales. L'extension de la collecte de données à d'autres pays, en plus de ceux qui ont déjà fait l'objet d'une enquête, peut fournir des indications sur les facteurs qui influencent la perception du programme FCC par la population. Les conclusions devraient être régulièrement communiquées à la direction du CERN et au Conseil, et résumées en vue d'une diffusion plus large auprès de toutes les parties prenantes, y compris le public, par le biais de canaux tels que les plateformes de médias sociaux du CERN et ses principaux sites web.

## 5. Références

- [1] L. Ulrici. Stratégie de gestion et d’usage des matériaux excavés (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14923266>
- [2] L. Ulrici. Excavated materials management and use strategy (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13785651>
- [3] Association français des tunnels et de l’espace souterrain. La gestion et l’emploi des matéri-aux excavés. GT35R1F2 (2017). URL <https://www.aftes.fr/fr/product/la-gestion-et-lemploi-des-materiaux-excaves-gt35r1f2/>
- [4] Centre d’Études des Tunnels. Matériaux géologiques excavés en travaux souter-rains. spécificités, scénarios de gestion et rôle des acteurs.CETU information doc-ument (2016).URL [https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cetu\\_di\\_gestion\\_des\\_materiaux\\_05-2016-version\\_corrige-bd.pdf](https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cetu_di_gestion_des_materiaux_05-2016-version_corrige-bd.pdf)
- [5] Swiss Federal Council. Ordinance on the avoidance and the disposal of waste. ADWO 814.600 (2016). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/en>
- [6] Swiss Federal Council. Verordnung über den verkehr mit abfällen (VeVA). AS 2005 4199 (2005). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2005/551/de>
- [7] UN Environment Programme. Basel convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal (2014). URL <https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-e.pdf>
- [8] European Union. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novem-bre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. JO L 312 du 22 novembre, pp 3–30 (2008). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=celex%3A32008L0098>
- [9] Direction générale de la prévention des risques. Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols pollués dans des projets d’aménagement. Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). URL [https://tex-infoterre.brgm.fr/sites/websites/tex-infoterre.brgm.fr/files/documents/2022-10/2020\\_04\\_Guide\\_TEX\\_Non\\_SSP.pdf](https://tex-infoterre.brgm.fr/sites/websites/tex-infoterre.brgm.fr/files/documents/2022-10/2020_04_Guide_TEX_Non_SSP.pdf)
- [10] Office cantonal de l’environnement (OCEV). Déchets - guide technique des applications recom-mandées dans le cadre du projet ecomatge. Réduisons nos déchets, Exportation de matéri-aux d’excavation non pollués (2018). URL <https://www.ge.ch/document/dechets-guide-technique-applications-recommandees-dans-cadre-du-projet-ecomatge>
- [11] A. Abada, et al., FCC-ee: The lepton collider. The European Physical Journal Special Topics 228(2), 261–623 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>. URL <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>
- [12] J. Gutleber, P. Laidouni, V. Mertens, A. Bibet-Chevalier, P. Boillon, S. Favre, G. Chapellier, F. Gorgerino, C. Tétré, C. Malan, J. Joos, S. Tissandier, L. Petitpain, M. Sauvain. Synthèse des contraintes et opportunités d’implantation du futur collisionneur circulaire (fcc) (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14773243>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.14773243>
- [13] Ministère de la transition écologique, Commissariat général au développement durable. Guide pour la mise en oeuvre de l’évitement. concilier environnement et aménage-ment des territoires. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/evaluation/article/eviter-reduire-compenser-erc-en-quoi-consiste-cette-demarche> (2021).URL [https://www.notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/guide\\_evitement\\_vf.pdf](https://www.notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/guide_evitement_vf.pdf)
- [14] Cerema. Évaluation environnementale des projets d’infrastructures (2020). URL <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/evaluation-environnementale-projets-infrastructures>. Accessed: 2025-03-05

- [15] UN Industrial (2019). Development Organisation. International guidelines for industrial parks URL [https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-11/International\\_Guidelines\\_for\\_Industrial\\_Parks.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-11/International_Guidelines_for_Industrial_Parks.pdf)
- [16] International Organization for Standardization. ISO 14006:2020 Environmental management systems — Guidelines for incorporating ecodesign (2020). Available at: <https://www.iso.org/standard/72644.html>
- [17] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. EUR-Lex European Union law site (2009). URL <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj>
- [18] N. Gunningham, R.A. Kagan, D. Thornton, Social Licence and Environmental Protection: Why Businesses Go Beyond Compliance. *Law & Social Inquiry* 29(2), 307–341 (2004)
- [19] ISO. Iso 14001:2015 environmental management systems (2015). URL <https://www.iso.org/standards/popular/iso-14000-family>
- [20] International Organization for Standardization. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines (2018). Available at: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- [21] B. Pierre, G. Johannes, L. Patrycja, V. Anne-Laure, Territorial constraint grid for France and Switzerland (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8403173>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.8403173>
- [22] B. Fargevieille, J. Frossard. Bilan des garanties (2025). URL <https://www.debatpublic.fr/projet-de-futur-collisionneur-circulaire-fcc-daccelerateur-de-particules-5952>. Accessed: 2025-03-25
- [23] République et Canton de Genève. Guide d'évaluation environnementale stratégique (2025). URL <https://www.ge.ch/document/guide-evaluation-environnementale-strategique>. Accessed: 2025-03-05
- [24] Confédération suisse. Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) (1984). URL [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122\\_1122\\_1122/fr](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/fr). Accessed: 2025-03-05
- [25] S. Opricovic, G.H. Tzeng, Compromise solution by mcdm methods: A comparative analysis of vikor and topsis. *European Journal of Operational Research* 156(2), 445–455 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- [26] DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. Schéma Régional des Carrières de la région Auvergne-Rhône-Alpes (2021). URL <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/src-documents-approuves-a20759.html>. Accessed: 2025-03-25
- [27] Canton of Geneva. Déchets résultant des activités de construction et de démolition – années 2019 à 2021 (2022). URL <https://www.ge.ch/document/dechets-resultant-activites-construction-demolition-annees-2019-2021>. Accessed March 25, 2025
- [28] Canton of Vaud. Statistiques sur les déchets – matériaux d'excavation inertes (2023). URL <https://www.vd.ch/themes/environnement/dechets/statistiques-sur-les-dechets/#c85800>. Accessed March 25, 2025
- [29] G. Kpamegan, L. Philipson, D. Stagnara, Vision stratégique Environnement, Écoconception et Développement durable (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14336970>
- [30] Setec and Ecotec and Marcelleon, Futur collisionneur circulaire: Analyse de l'état initial de l'environnement. Tech. rep., Setec, Ecotech and Marcelleon (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14801007>
- [31] Ministère de la Transition Écologique. Cartographie des projets d'envergure nationale (2024). URL <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/mesurer-la-consommation-despaces/cartographie-des-projets-denvergure-nationale>. Accessed: 2025-03-25
- [32] M. de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. Arrêté du 31 mai 2024 relatif à la mutualisation nationale de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers des projets d'envergure nationale ou européenne d'intérêt général majeur (2024). URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049676333>. Consulté le 25 mars 2025
- [33] A. Tudora, J. Osborne, V. Mertens, Feasibility study of a trans-Jura FCC scenario with one transfer line from the LHC (2020). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4545604>

- [34] O. Brüning, A. Seryi, S. Andrés, Electron-hadron colliders: Eic, lhec and fcc-eh. *Frontiers in Physics* 10, 886473 (2022). <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.886473>
- [35] M. Haas, D. Carraro, D. Ventra, M. Plötze, A.D. Haller, A. Moscariello, Integrated stratigraphic, sedimentological and petrographical evaluation for cern's future circular collider subsurface in-frastructure (geneva basin, switzerland-france). *Swiss Journal of Geosciences* 115(1), 16 (2022). <https://doi.org/10.1186/s00015-022-00407-y>
- [36] J. Stanyard, Y. Loo, V. Mertens, J. Osborne, C. Sturzaker, M. Sykes, in 8th International Particle Accelerator Conference (2017). <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPVA127>
- [37] A. Abada, et al., FCC-ee: The Lepton Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2. *Eur. Phys. J. ST* 228(2), 261–623 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>
- [38] J. Gutleber. Futur Collisionneur Circulaire: etude de trafic : etat initial (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14992820>
- [39] O. Ancelet, P. Boillon, J. Jobs, C. Malan, S. Tissandier. Faisabilité de connexions au réseau autoroutier (2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8255742>
- [40] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research. Ite - hypothèses et méthodologie de l'étude (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10633809>
- [41] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research. Ite - classification des sites (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10528636>
- [42] E. (France), E.O. for Nuclear Research, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PJ (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534566>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534566>
- [43] Egis (France) and CERN, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PL (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534572>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534572>
- [44] Egis (France) and CERN. Diagnostic Environnemental - Site de Charvonnex (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10533655>
- [45] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PG (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534517>
- [46] Egis (France) and CERN. Diagnostic environnemental - site de la roche sur foron (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10533313>
- [47] Egis (France) and CERN. Diagnostic environnemental - site d'eteaux (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10532758>
- [48] Egis (France) and CERN, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PF (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534351>
- [49] Egis (France) and CERN. Bande convoyeuse pour connexion ite des sites pj & pg (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10517186>
- [50] J. Gutleber. Renewable energy supply feasibility analysis (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10023947>
- [51] S. Auchapt, J. Schabram. Future Circular Collider: Clean Energy Supply Study (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7781077>
- [52] Meta. Meta 2024 sustainability report (2024). URL <https://sustainability.atmeta.com/wp-content/uploads/2024/08/Meta-2024-Sustainability-Report.pdf>. Accessed: 2025-01-18
- [53] J.F. Billerot, O. Bonnard. Étude exploratoire pour le raccordement du FCC au Réseau Public de Transport d'électricité français (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13364463>
- [54] J.P. Buri, Faisabilité du SIG d'alimentation en eau pour FCC au point LHC Pt8 (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10014173>
- [55] P. Charitos, D. Goldsworthy. Mining the future<sup>®</sup> innovation challenge results (2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10014173>

[//doi.org/10.5281/zenodo.7271364](https://doi.org/10.5281/zenodo.7271364)

- [56] D.J. Roche, Carlo Ratti Associati uses excavated earth to form a green roof on a new company canteen for Mutti in Italy's Food Valley. The Architect's Newspaper (2024). URL <https://www.archpaper.com/2024/12/mutti-italys-food-valley-carlo-ratti-associati/>
- [57] UNECE. Aarhus agreement ratification status online (2023). URL <https://unece.org/environment-policy/public-participation/aarhus-convention/status-ratification>
- [58] United Nations. Espoo agreement ratification status online (1989). URL <https://treaties.un.org/pages/showDetails.aspx?objid=080000028002887c&clang=en>
- [59] J. Gutleber and S. Valette and P. Laidouni, Futur collisionneur circulaire: Aspects environnementaux. Tech. rep., CERN (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14801032>
- [60] D. Mauree. FCC Construction Carbon Footprint Benchmark and Optimisation Strategies (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13899160>
- [61] CERN. Volume 3 CERN Environment Report (2023). <https://doi.org/10.25325/CERN-Environment-2023-003>
- [62] Alliance HQE GBC, France. High-quality environmental certification (1996). URL <https://www.hqegbc.org/>
- [63] CERN's main objectives for the period 2021-2025. Restricted Council - Two-Hundred-and-Fourth Session (2021). URL <https://cds.cern.ch/record/2783560>
- [64] European Organization for Nuclear Research (CERN). Accord relatif à la radioprotection en-tre le conseil fédéral suisse et l'organisation européenne pour la recherche nucléaire (2010). URL [https://legal-service.web.cern.ch/system/files/downloads/Accord%20Radio%20protection%20CERN%20FR%20CH-2010\\_0.pdf](https://legal-service.web.cern.ch/system/files/downloads/Accord%20Radio%20protection%20CERN%20FR%20CH-2010_0.pdf)
- [65] J. Gutleber. Renewable energy supply feasibility analysis (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8074977>
- [66] RTE. Programmes pluriannuelles de l'énergie (PPE). <https://www.ecologie.gouv.fr/programmes-pluriannuelles-lenergie-ppe> (2023). Accessed: 2023-10-13
- [67] RTE. Rationalising the way in which the grid is operated (2020). URL <https://www.rte-france.com/en/accelerate-energy-transition/rationalised-use-grid>
- [68] RTE Bilan Electrique 2023, rapport complet. [https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-03/Bilan%20l%27ectrique%202023%20rapport%20complet\\_29fev24.pdf](https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-03/Bilan%20l%27ectrique%202023%20rapport%20complet_29fev24.pdf) (2024)
- [69] Réseau de Transport d'Électricité (RTE), Schéma décennal de développement du réseau à horizon 2040. Tech. rep., RTE (2025). URL <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau>. Accessed: 2025-03-08
- [70] World Resources Institute, GHG Protocol Scope 2 Guidance. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (2022). URL [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Scope2\\_ExecSum\\_Final.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Scope2_ExecSum_Final.pdf)
- [71] Lazard's levelized cost of energy+, version 2023. URL <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/>. Accessed: 2023-10-13
- [72] International Energy Agency, Managing seasonal and interannual variability of renewables. Tech. rep., IEA (2023). URL <https://www.iea.org/reports/managing-seasonal-and-interannual-variability-of-renewables>
- [73] Ember Energy. Ember Energy Website, European Wholesale Electricity Price Data (2025). URL <https://ember-energy.org/data/european-wholesale-electricity-price-data/>
- [74] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie ii : Étude du process de valorisation et voies d'optimisation (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192180>
- [75] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie iii : Analyse

- technico-économique et technologies complémentaires (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14719832>
- [76] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie i : Étude de la con-sommation du territoire et du potentiel de valorisation. (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192000>
- [77] République et canton de Genève. Réseaux thermiques structurants - rts (2024). URL <https://www.ge.ch/installer-remplacer-chauffage/reseaux-thermiques-structurants-rts-0>. Accessed: 2025-03-26
- [78] X. Yuan, Y. Liang, X. Hu, Y. Xu, Y. Chen, R. Kosonen, Waste heat recoveries in data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188, 113777 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>
- [79] CERN. CERN Environment Report 2021-2022 (2022). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022>
- [80] Paris 2024 Press Office. Paris 2024 Website (2024). URL <https://presse.paris2024.org/actualites/brief-presse-sur-la-strategie-carbone-de-paris-2024-04f7-e0190.html>
- [81] Dittmer, M. and Geraetset, F. and Schwipps, A. Die Klimabilanz Berliner U-Bahn und Strassenbahn planungen (2023). URL <https://klimabilanz-ubahn-tram.de/download/klimabilanz-ubahn-tram-2023-01.pdf>
- [82] CERN. CERN Environment Report 2021–2022 (2023). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022>. Online; accessed 26-March-2025
- [83] ENGIE. ENGIE Elec’verte contract carbon footprint, Press release (2021). URL <https://particuliers.engie.fr/content/dam/PDF-CP/Dossier-presse-ENGIE-reduction-impact-carbone.pdf>
- [84] European Union Climate Action. France - eu climate action (2023). URL [https://climate.ec.europa.eu/document/download/9e28924b-8d69-4338-957a-5a46d0e4e606\\_en?filename=fr\\_2023\\_factsheet\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/document/download/9e28924b-8d69-4338-957a-5a46d0e4e606_en?filename=fr_2023_factsheet_en.pdf). Accessed: March 26, 2025
- [85] CERN, CERN’s strategy with respect to the environment Horizon 2030 objectives. Tech. rep., CERN (2024). URL <https://edms.cern.ch/document/3161491/1>
- [86] Gouvernement Français. Code de l’environnement (2020). URL [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000041599138](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041599138)
- [87] C. Bouget, L. Larrieu, H. Brustel, F. Gosselin, Indice de biodiversité potentielle (ibp) : une méth-ode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des forêts. *Revue Forestière Française* 66(2), 145–156 (2014). <https://doi.org/10.4267/2042/28373>
- [88] Centre National de la Propriété Forestière (CNPf). Index of Biodiversity Potential (IBP) (2025). URL <https://www.cnpf.fr/ibp-index-biodiversity-potential>
- [89] Grand Genève, Projet d’agglomération de 4ème génération Grand Genève - Rapport principal. Tech. rep., Grand Genève (2021)
- [90] Lemanbleu TV Suisse. Le château voltaire (2018). URL <https://www.lemanbleu.ch/fr/Actualite/Archives/Le-chateau-de-Voltaire-entierement-renove.html>
- [91] A. Galindo, Qu’est-ce que le rayonnement ? IAEA Agence Internationale de l’énergie atomique (2024). URL <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/quest-ce-que-le-rayonnement>
- [92] Direction generale de la sante (DGS), Champs electromagnetiques d’extremement basse frequence. Tech. rep., Ministère des Affaires so-ciales et de la Sante (2014). URL [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs\\_electromagnetiques\\_extremement\\_basse\\_frequence\\_DGS\\_2014.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs_electromagnetiques_extremement_basse_frequence_DGS_2014.pdf)
- [93] European Research Infrastructures. European Commission site on strategy for research and in-novation. URL [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructures\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructures_en)
- [94] A. Stuart, A. Bond, A.M. Franco, J. Baker, C. Gerrard, V. Danino, K. Jonesf, Conceptu-alising

- social licence to operate. Resources Policy (2023). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103962>
- [95] T. Schwab, A. Andreadakis, C. Bigard, N. Delille, F. Sarrazin, Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique. guide de mise en œuvre. Tech. rep., Cerema (2021). URL [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Approche\\_standardis%C3%A9e\\_dimensionnement\\_compensation\\_%C3%A9cologique.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Approche_standardis%C3%A9e_dimensionnement_compensation_%C3%A9cologique.pdf). Accessed: 2025-03-26
- [96] International Standards Organisation, ISO 1408 – monetary valuation of environmental impacts and related environmental aspects (2019)
- [97] International Standards Organisation, ISO 14007:2019 environmental management — guidelines for determining environmental costs and benefits (2019)
- [98] Commissariat Général à l’Investissement. L’évaluation socio-économique des grands projets d’investissements publics. French Government (2018). URL [https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites\\_default\\_files\\_contenu\\_piece-jointe\\_2018\\_06\\_2015\\_11\\_27\\_eval\\_socio-eco\\_et\\_eval\\_fin.pdf](https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default_files_contenu_piece-jointe_2018_06_2015_11_27_eval_socio-eco_et_eval_fin.pdf)
- [99] Encouragement of research and innovation (sectoral plan and plan approval procedure) (2024). URL <https://www.parlament.ch/en/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaef?t=AffairId=20240029>
- [100] Seventeen objects pass the parliament stage (2024). URL [https://www.parlament.ch/fr/services/news/Pages/2024/20240927094048215194158159026\\_bsf042.aspx](https://www.parlament.ch/fr/services/news/Pages/2024/20240927094048215194158159026_bsf042.aspx)
- [101] Conseil fédéral. Projet mis en consultation: Ordonnance concernant l’approbation des plans des constructions et installations du CERN (OCIC). Confédération Suisse. Fedlex. La plateforme de publication du droit fédéral. (2025). URL [https://fedlex.data.admin.ch/eli/dl/proj/2025/3/cons\\_1](https://fedlex.data.admin.ch/eli/dl/proj/2025/3/cons_1)
- [102] Autorité environnementale (CGEDD). Note de l’autorité environnementale sur les évaluations socio-économiques des projets d’infrastructures linéaires de transport. In-spection générale de l’Environnement et du Développement durable (IGEDD) (2017). URL [https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/170913\\_-\\_note\\_evaluation\\_socio-economique\\_-\\_deliberee\\_cle0bea57.pdf](https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/170913_-_note_evaluation_socio-economique_-_deliberee_cle0bea57.pdf)
- [103] BMBF, Guidelines for preparing the draft proposal for a large research infrastructure for the national prioritisation process of the federal ministry of education and research. www.wissenschaftsrat.de (2024). URL [https://www.wissenschaftsrat.de/download/2024/FIS\\_Guidelines\\_Prioritisation](https://www.wissenschaftsrat.de/download/2024/FIS_Guidelines_Prioritisation)
- [104] J. Ferretti, K. Daedlow, J. Kopfmüller, M. Winkelmann, A. Podhora, et al., Framework for reflection on research with societal responsibility. www.nachhaltig-forschen.de (2023). URL [https://www.nachhaltig-forschen.de/assets/lena\\_nachhaltig-forschen/user\\_upload/20240216\\_LeNa-Reflexionsrahmen\\_ENG\\_v03\\_HighRes.pdf](https://www.nachhaltig-forschen.de/assets/lena_nachhaltig-forschen/user_upload/20240216_LeNa-Reflexionsrahmen_ENG_v03_HighRes.pdf)
- [105] Connecting Europe Facility. CINEA guide on economic appraisal for CEF-T transport projects. European Commission (2022). URL [https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/guidance/cinea-guidance-on-economic-appraisal\\_cef-t\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/guidance/cinea-guidance-on-economic-appraisal_cef-t_en.pdf)
- [106] Economic Commission for Europe. Cost benefit analysis for transport infrastructure projects. UNECE website (2003). URL <https://unece.org/DAM/trans/doc/2008/wp5/CBAe.pdf>
- [107] European Network of Transmission System Operators for Electricity. ENTSO-E guideline for cost benefit analysis of grid development projects. ENTSOE Website (2024). URL [https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/news/2024/entso-e\\_4th\\_CBA\\_Guideline\\_240409.pdf](https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/news/2024/entso-e_4th_CBA_Guideline_240409.pdf)
- [108] European Commission, Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects (Publications Office of the European Union, European Commission, B-1160 Brussels, Belgium, 2015). <https://doi.org/doi:10.2776/97516>

- [109] European Commission and Directorate-General for Environment, The economic benefits of the Natura 2000 network – Synthesis report (Publications Office, 2013). [https://doi.org/ 10.2779/41957](https://doi.org/10.2779/41957)
- [110] R. Articolò, M. Florio. CBA in decision-making processes of EU-27). CISL Working Paper N. 01/2023 (2023). URL [https://www.csilmilano.com/wp-content/uploads/2023/12/WP2023\\_01.pdf](https://www.csilmilano.com/wp-content/uploads/2023/12/WP2023_01.pdf)
- [111] F. Giffoni, S. Vignetti, Assessing the socioeconomic impact of research infrastructures: A systematic review of existing approaches and the role of cost-benefit analysis. *L'industria, Rivista di economia e politica industriale* 1, 75–102 (2019). <https://doi.org/10.1430/94060>
- [112] OECD, Cost-Benefit Analysis and the Environment (OECD, 2018), p. 456. <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>
- [113] J. Montalvo, J. Raya. Economic and Social Impact of ALBA II (2023). URL [https://www.cells.es/en/science-at-alba/alba-ii-upgrade/socioeconomicimpact\\_albaii-eng.pdf](https://www.cells.es/en/science-at-alba/alba-ii-upgrade/socioeconomicimpact_albaii-eng.pdf)
- [114] VertigoLab. Etude d'impact socio-économique de SOLEIL. Site web VertigoLab (2020). URL <https://vertigolab.eu/portfolio/etude-dimpact-socio-economique-de-soleil-methode-multiplificateur/>
- [115] H. Kroll, T. Stahlecker, A. Zenker, Impact-Studie für die Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III im Kontext des Forschungs- und Innovationsökosystems DESY. Tech. rep., DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) (2023). <https://doi.org/10.24406/publica-19299>. Accessed: 2025-03-10
- [116] G. Battistoni, M. Genco, M. Marsilio, C. Pancotti, S. Rossi, S. Vignetti, Cost–benefit analysis of applied research infrastructure. Evidence from health care. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 79–91 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.04.001>
- [117] M. Florio, S. Forte, E. Sirtori, Cost-Benefit Analysis of the Large Hadron Collider to 2025 and beyond. Tech. rep., CERN (2015). URL <https://cds.cern.ch/record/2036479>
- [118] A. Bastianin, Findings from the LHC/HL-LHC Programme (Springer International Publishing, Cham, 2021), pp. 71–77. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52391-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52391-6_10)
- [119] A. Bastianin, M. Florio, Social Cost Benefit Analysis of HL-LHC. Tech. rep., CERN, Geneva (2018). URL <https://cds.cern.ch/record/2319300>
- [120] A. Bastianin, C. F. Del Bo, M. Florio, F. Giffoni, Projecting the socio-economic impact of a big science center: the world's largest particle accelerator at CERN. *Applied Economics* 55(49), 5768–5789 (2023). <https://doi.org/10.1080/00036846.2022.2140763>
- [121] A. Magazinik, Investigating the Societal Impact of Large Research Infrastructure : A Study on the Compact Linear Collider at CERN. Ph.D. thesis, Tampere U. (2022). URL <https://cds.cern.ch/record/2836841>. Presented on 2022-11-11
- [122] CSIL and CERN. Socio-economic impacts of the lepton collider-based research infrastructure (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10653396>
- [123] S. Cuccuru, L. Vargiu, L. Deidda, B. Biagi, G. Atzeni, Einstein Telescope: An Assessment of Its Economic, Social and Environmental Impact in Sardinia (Smashwords, 2021)
- [124] A. Boisdet, J. Maurice. Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet de réseau de chaleur et de froid sur l'aquifère de l'Albien de l'établissement public Paris-Saclay (2015). URL [https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites\\_default/files\\_contenu\\_piece-jointe\\_2021\\_04\\_ce\\_chaleur\\_saclay.pdf](https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2021_04_ce_chaleur_saclay.pdf)
- [125] K. Bouabdallah, S. Larger, P.Y. Steunou. Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet de construction d'un campus santé à Nantes (2020). URL [https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites\\_default/files\\_contenu\\_piece-jointe\\_2021\\_04\\_rapport\\_ce\\_qhu\\_version\\_finale\\_propre.pdf](https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2021_04_rapport_ce_qhu_version_finale_propre.pdf)
- [126] A. Walsh, J. Merker, A. de Hernandez, A. O'Connor. The Value of CSIRO: The Broader Impact of CSIRO's Portfolio of Activities. CSIRO Website (2022). URL <https://www.csiro.au/en/about/Corporate-governance/Ensuring-our-impact/Auditing-our-impact/2022->

impact-assessment

- [127] D. Adamst, A. Tiplady, F. Sgard. Integration of socio-economic impact into the development of the square kilometre array (ska) in south africa. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, OECD Publishing, Paris (2023). <https://doi.org/10.1787/04438223-en>
- [128] B. Dervaux, L. Rochaix, et al. L'évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public (2022). URL [https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2022-rapport-sante-mars\\_0.pdf](https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2022-rapport-sante-mars_0.pdf)
- [129] A. Palmisano, Realizzazione di un parco agrivoltaico avanzato di potenza nominale pari a 24 MWp denominato "MACOMER" sito nei comuni di Macomer e Borore (NU). Tech. rep., Enerland Italia s.r.l. (2023). URL <https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/9533/14003>
- [130] Linee guida operative per la valutazione degli investimenti in opere pubbliche. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2022). URL [https://www.mit.gov.it/nfsmitegov/files/media/documentazione/2022-09/LINEE%20GUIDA%20SETTORE%20IDRICO\\_14.09.2022.pdf](https://www.mit.gov.it/nfsmitegov/files/media/documentazione/2022-09/LINEE%20GUIDA%20SETTORE%20IDRICO_14.09.2022.pdf)
- [131] European Commission. ESFRI roadmap entry submission form on-line (2023). URL [https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI\\_Roadmap2026\\_Proposal\\_Submission\\_Questionnaire\\_FINALv2.pdf](https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI_Roadmap2026_Proposal_Submission_Questionnaire_FINALv2.pdf)
- [132] European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI). Esfri roadmap 2026 – public guide (2024). URL [https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI\\_Roadmap2026\\_Public%20Guide\\_approved\\_FINAL.pdf](https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI_Roadmap2026_Public%20Guide_approved_FINAL.pdf). Accessed: 2025-03-16
- [133] European Commission. European Research Area (ERA) website (2023). URL [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-area\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-area_en)
- [134] European Commission. European Strategy Forum on Research Infrastructures (2025). URL <https://www.esfri.eu>
- [135] European Commission. European Research Infrastructure Consortium (ERIC) (2023). URL [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructures/eric\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructures/eric_en)
- [136] Regulation (EU) 2021/695 of the European Parliament and of the Council establishing Horizon Europe – the Framework Programme for Research and Innovation. EUR-Lex European Union law site (2021). URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/695/oj>
- [137] ESFRI Long Term Sustainability Working Group, Long-Term Sustainability of Research Infrastructures, vol. 2 (ESFRI Scripta, published by Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Milano, Italy, 2017). URL [https://www.esfri.eu/sites/default/files/u4/esfri\\_scripta\\_vol2\\_web.pdf](https://www.esfri.eu/sites/default/files/u4/esfri_scripta_vol2_web.pdf)
- [138] ESFRI - European Strategy Forum on Research Infrastructures, Guidelines in cost estimation of research infrastructures. Tech. rep., ESFRI (2020). URL [https://www.esfri.eu/sites/default/files/StR-ESFRI2\\_STUDY\\_RIs\\_COST\\_ESTIMATION\\_0.pdf](https://www.esfri.eu/sites/default/files/StR-ESFRI2_STUDY_RIs_COST_ESTIMATION_0.pdf)
- [139] J. Kolar, G. Lutz, K. Angelieva, J. Angelis, B. Brecko, M. Chamberlain, E. Guittet, F. Karayan-nis, J. Plaskan, M. Ryan, D. Sobczak, P. Wenzel-Constabel, ESFRI policy brief on assessment of impact of research infrastructures. Tech. rep., ESFRI (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8091633>
- [140] OECD. Better Criteria for Better Evaluation (2025). URL <https://www.oecd.org/dac/evaluation/revised-evaluation-criteria-dec-2019.pdf>
- [141] European Commission. European Research Infrastructure Consortium (ERIC) (2025). URL <https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/better-regulation-guidelines-impact-assessment.pdf>
- [142] Regulation (EU) No 1303/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 laying down common provisions on the European Regional Development Fund, the European Social Fund, the Cohesion Fund, the European Agricultural Fund for Rural Development and the European Maritime and Fisheries Fund and laying down general provisions on the European Regional Development Fund, the

- European Social Fund, the Cohesion Fund and the European Maritime and Fisheries Fund and repealing Council Regulation (EC) No 1083/2006 – Article 100 (2013). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013R1303>. Accessed: 2025-03-16
- [143] European Commission, Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 (Publications Office of the European Union, European Commission, B-1049 Brussels, Belgium, 2021). <https://doi.org/10.2776/182302>
- [144] Regulation (EU) no 2015/207 of the European Parliament and of the Council for carrying out the cost-benefit analysis. EUR-Lex European Union law site (2015)
- [145] United Nations Industrial Development Organization, Guide to practical project appraisals: Social benefit-cost analysis in developing countries (UNIDO Publication, 1980). URL <https://downloads.unido.org/ot/48/06/4806860/Practical%20Appraisal%20of%20Industrial%20Projects,%20application%20of%20so.pdf>
- [146] The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB (Publications Office of the European Union, 98-100, boulevard Konrad Adenauer, L-2950 Luxembourg, 2023). <https://doi.org/10.2867/076767>
- [147] Code de l'environnement. Légifrance (2024). URL [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte\\_lc/LEGITEXT000006074220/](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074220/)
- [148] European Commission. Code de l'environnement: Sous-section 5: Information et participation du public (2019). URL [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000038247366](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038247366)
- [149] Évaluation des grands projets d'investissement publics. annexe au projet de loi de finances pour 2024 (jaunes budgétaires). La plateforme des finances publiques, du budget de l'État et de la performance publique (2023). URL <https://www.budget.gouv.fr/documentation/documents-budgetaires/exercice-2024>
- [150] R. Guesnerie. Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/guide-de-levaluation-socioeconomique-investissements-publics-edition-2023> (2023). URL <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-guide-evaluation-investissements-publics-septembre.pdf>
- [151] France Stratégie, Guide d'évaluation des investissements publics. Tech. rep., France Stratégie (2023). URL <https://www.strategie.gouv.fr/files/2025-01/fs-2023-guide-evaluation-investissements-publics-septembre.pdf>. Version: septembre 2023
- [152] Schweizerische Eidgenossenschaft. Federal act on the promotion of research and innovation (2023). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2013/786/en>
- [153] Keystone-SDA. Erstes Ja zu Planungsgrundlagen für Kernforschungszentrum CERN (2024). URL [https://www.parlament.ch/de/services/news/Seiten/2024/20240529172502542194158159026\\_bsd172.aspx](https://www.parlament.ch/de/services/news/Seiten/2024/20240529172502542194158159026_bsd172.aspx)
- [154] Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), Plan sectoriel cern. Tech. rep., Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) (2025). URL [https://www.sbf.admin.ch/dam/sbf/de/dokumente/2024/10/plan\\_sectoriel\\_cern.pdf.download.pdf/plan\\_sectoriel\\_cern\\_de.pdf](https://www.sbf.admin.ch/dam/sbf/de/dokumente/2024/10/plan_sectoriel_cern.pdf.download.pdf/plan_sectoriel_cern_de.pdf). Consultation document.for-lcaca
- [155] M. Florio, S. Forte, C. Pancotti, E. Sirtori, S. Vignetti, Exploring cost-benefit analysis of research, development and innovation infrastructures: An evaluation framework. Tech. rep., Università di Milano (2016). URL <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1603/1603.03654.pdf>
- [156] International Standards Organisation, ISO 14040:2006 environmental management — life cycle assessment — principles and framework (2006)
- [157] European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, International reference life cycle data system (ILCD) handbook - general guide for life cycle assessment - detailed guidance (2010). URL <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- [158] I. Vogel, Review of the Use of 'Theory of Change' in International Development (UK Department for

- International Development (DFID), 2012). URL [https://www.theoryofchange.org/pdf/DFID\\_ToC\\_Review\\_VogelV7.pdf](https://www.theoryofchange.org/pdf/DFID_ToC_Review_VogelV7.pdf)
- [159] Research infrastructures' impact assessment toolkit - RI-PATHS (2024). URL <https://ri-paths-tool.eu>
- [160] G. Boulton. Science as a Global Public Good. International Science Council Position Paper. International Science Council (2021). <https://doi.org/10.24948/2021.09>
- [161] M. Mazzucato, The entrepreneurial state : debunking public vs. private sector myths. Anthem frontiers of global political economy (Anthem Press, London, 2013). URL <https://www.bibsonomy.org/bibtex/2e9d0215a37508b77b5f48afda5a55c7c/meneteqel>
- [162] M. Scudellari, The sprint to solve coronavirus protein structures — and disarm them with drugs. Nature 581, 252–255 (2020). <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01444-z>
- [163] J. Buchanan, G. Tullock, The calculus of consent, logical foundations of constitutional democracy (University of Michigan Press, Ann Arbor, 1962), p. 361
- [164] R. Solow, A guide to modern economics (Routledge, 1996), p. 19. Growth theory
- [165] A. Akerlof, J. Spence, J. Stiglitz. Information for the Public, Markets with Asymmetric Information (2001). URL <https://sustainability.atmeta.com/2024-sustainability-report/>. Nobel Prize in Economics documents 2001-1
- [166] E. Ostrom. The economics of common-pool resources (2000)
- [167] J. Tirole. Market power and regulation (2001). Nobel Prize in Economic Sciences 2014
- [168] P. Milgrom, R. Wilson. Improvements to auction theory and inventions of new auction formats (2020). Nobel Prize in Economic Sciences 2020
- [169] R. Davis, The Value of Outdoor Recreation: An Economic Study of the Maine Woods (Harvard University., 1963). URL <https://books.google.ch/books?id=jeRxbwAACAAJ>
- [170] K. Arrow, Report of noaa panel on contingent valuation. 58 Federal Register 4601 (1993). URL <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/60900>
- [171] R. Carson, R. Mitchell, M. Hanemann, R. Kopp, S. Presser, P. Ruud, Contingent valuation and lost passive use: Damages from the Exxon Valdez oil spill. Environmental and Resource Economics 25(3), 257–286 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1024486702104>
- [172] G. Catalano, M. Florio, F. Giffoni, Willingness to pay for basic research: A contingent valuation experiment on the Large Hadron Collider. Departmental working papers, Department of Economics, Management and Quantitative Methods at Università degli Studi di Milano (2016). URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:mil:wpdepa:2016-03>
- [173] A. Bastianin, M. Florio, LHC upgrade brings benefits beyond physics. CERN Courier (2018). URL <https://cerncourier.com/a/lhc-upgrade-brings-benefits-beyond-physics>
- [174] F. Giffoni, M. Florio, Public support of science: A contingent valuation study of citizens' attitudes about CERN with and without information about implicit taxes. Research Policy 52(1), 104627 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104627>
- [175] K. Petrinoli, S. Mirasgedis, N. Mihalopoulos, T. Petäjä, E. Juurola. The impact of ac-tris on society: outcome of a contingent valuation study. ACTRIS Website (2023). URL [https://www.actris.eu/sites/default/files/Documents/ACTRIS%20IMP/Deliverables/ACTRIS%20IMP\\_WP3\\_D3.3\\_The%20impact%20of%20ACTRIS%20on%20society%20-%20outcome%20of%20a%20Contingent%20Valuation%20study.pdf](https://www.actris.eu/sites/default/files/Documents/ACTRIS%20IMP/Deliverables/ACTRIS%20IMP_WP3_D3.3_The%20impact%20of%20ACTRIS%20on%20society%20-%20outcome%20of%20a%20Contingent%20Valuation%20study.pdf)
- [176] European Commission, Better Regulation Toolbox (2023). URL [https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation-guidelines-and-toolbox/better-regulation-toolbox\\_en](https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation-guidelines-and-toolbox/better-regulation-toolbox_en). Accessed: 2025-02-07
- [177] L. Secci. The value of particle physics research at CERN as public good (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7766949>

- [178] R.J. Johnston, J. Rolfe, R.S. Rosenberger, R. Brouwer, *Introduction to Benefit Transfer Methods* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2015), pp. 19–59. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0_2)
- [179] T. Camporesi, G. Catalano, M. Florio, F. Giffoni, Experiential learning in high energy physics: a survey of students at the LHC. *European Journal of Physics* 38(2), 025703 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa5121>
- [180] R. Crescenzi, G. Piazza. Recommendations to increase the socio-economic impact of the Future Circular Collider for member states (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13166167>
- [181] CSIL. Assessing scientific knowledge creation and dissemination in an open science world: evidence from the CERN experiments (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13920183>
- [182] V. Morretta, D. Vurchio, S. Carrazza, The socio-economic value of scientific publications: The case of earth observation satellites. *Technological Forecasting and Social Change* 180, 121730 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121730>
- [183] J. Gutleber, P. Charitos (eds.), *From Science to Society: The Open Science and Innovation and Network Approach* (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 1–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_1)
- [184] E. Griniece, J. Angelis, A. Reid, S. Vignetti, J. Catalano, A. Helman, M. Rami, H. Kroll. *Guidebook for Socio-Economic Impact Assessment of Research Infrastructures* (2020). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3950043>
- [185] P. Castelnovo, M. Florio, S. Forte, L. Rossi, E. Sirtori, The economic impact of technological procurement for large-scale research infrastructures: Evidence from the large hadron collider at cern. *Research Policy* 47(9), 1853–1867 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.06.018>
- [186] M. Florio, E. Sirtori, Social benefits and costs of large scale research infrastructures. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 65–78 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.024>
- [187] M. Florio, F. Giffoni, A. Giunta, E. Sirtori, Big science, learning, and innovation: evidence from CERN procurement. *Industrial and Corporate Change* 27(5), 915–936 (2018). <https://doi.org/10.1093/icc/dty029>
- [188] E. Autio, A.P. Hameri, O. Vuola, A framework of industrial knowledge spillovers in big-science centers. *Research Policy* 33(1), 107–126 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(03\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(03)00105-7)
- [189] M. Nordberg, A. Campbell, A. Verbeke, Using customer relationships to acquire technological innovation: A value-chain analysis of supplier contracts with scientific research institutions. *Journal of Business Research* 56(9), 711–719 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0148-2963\(01\)00256-9](https://doi.org/10.1016/S0148-2963(01)00256-9).  
Interorganizational Relationships and Networks
- [190] E. Sirtori, G. Catalano, F. Giffoni, C. Pancotti, A. Caputo, M. Florio, Impact of CERN procurement actions on industry: 28 illustrative success stories (CERN, Geneva, 2019). URL <https://cds.cern.ch/record/2670056>
- [191] R. Crescenzi, G. Piazza, *How to Measure the Local Economic Impact of Large Research Infrastructure Procurement* (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 137–148. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_11)
- [192] E. Moretti, Local multipliers. *American Economic Review* 100(2), 373–77 (2010). <https://doi.org/10.1257/aer.100.2.373>
- [193] M. Florio, S. Forte, E. Sirtori, Forecasting the socio-economic impact of the Large Hadron Collider: A cost–benefit analysis to 2025 and beyond. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 38–53 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.007>
- [194] I.d.R. Crespo Garrido, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of a Collaborative Platform in a Global Project. *The Indico Case Study* (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 163–180. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_13)
- [195] I.d.R. Crespo Garrido, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of an Open Scientific Data and

- Documentation Platform in a Global Project: The Case of Zenodo (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 181–200. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_14)
- [196] C. Garrido, I. del Rosario, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of Open Science at CERN: An Analysis Based on a Travel Cost Model (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 63–80. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_5)
- [197] U.S. National Aeronautics and Space Administration. Nasa texas economic snapshot. <https://comptroller.texas.gov/economy/economic-data/nasa/snapshot.php> (2024). URL <https://comptroller.texas.gov/economy/economic-data/nasa/docs/snapshot.pdf>
- [198] D. Weaver, Celestial ecotourism: new horizons in nature-based tourism. *Journal of Ecotourism* 10(1), 38–45 (2011). <https://doi.org/10.1080/14724040903576116>
- [199] L. van Wyk-Jacobs, Astro-tourism as a catalyst for rural route development. Ph.D. thesis, University of Pretoria, South Africa (2018). URL <http://hdl.handle.net/2263/70036>. PhD Thesis
- [200] F. Blekman, A. Cardini, L.X.C. Saravia, Crowd-sourced particle physics stories from desy-cms (2024). URL <https://arxiv.org/abs/2410.04967>. arXiv:2410.04967 [physics.soc-ph]
- [201] Swiss Confederation. Botschaft zur Änderung des bundesgesetzes über die förderung der forschung und der innovation (sachplan und plangenehmigungsverfahren). Fedlex. Die Publikationsplattform des Bundesrechtes (2024). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2024/532>
- [202] République française. Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Légifrance (2024). URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>
- [203] European Commission. Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 december 2018 on the governance of the energy union and climate action. EUR-Lex European Union law site (2018). URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>
- [204] G. Alligand, S. Hubert, T. Legendre, F. Millar, A. Müller. Évaluation environnementale. guide d'aide à la définition des mesures etc. Ministère de la transition écologique et solidaire (2018). URL <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9ma%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>
- [205] Office fédéral du développement territorial (ARE). Plan sectoriel des surfaces d'assolement (sda) (2020). URL <https://www.aren.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/raumplanung/dokumente/bericht/b1-sachplan-fruchtfolgeflachen-08052020.pdf.download.pdf/b1-plan-sectoriel-des-surfaces-dassolement-08052020.pdf>. Consulté en mars 2025
- [206] Office fédéral de l'environnement OFEV. Compensation écologique. BAFU/OFEV website. (2022). URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/biodiversite/info-specialistes/utilisation-durable-de-la-biodiversite/compensation-ecologique.html>
- [207] Swiss Confederation. Federal Act on the Protection of Nature and Cultural Heritage. Fedlex. The publication platform for federal law. (1966). URL [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637\\_1694\\_1679/en](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/en)
- [208] A. Bastianin, P. Castelnovo, M. Florio, A. Giunta. Technological learning and innovation gestation lags at the frontier of science: from cern procurement to patent (2019). URL <https://arxiv.org/abs/1905.09552>
- [209] E. Sirtori, G. Catalano, F. Giffoni, C. Pancotti, A. Caputo, M. Florio, Impact of CERN procurement actions on industry: 28 illustrative success stories (CERN, Geneva, 2019). URL <https://cds.cern.ch/record/2670056>
- [210] CERN. Knowledge transfer centre at CERN (2000). URL <https://kt.cern/> [211] DESY. Knowledge transfer centre at DESY (2000). URL <https://innovation.desy.de>
- [212] INFN. Knowledge transfer centre at INFN (2000). URL <https://web.infn.it/TechTransfer/> [213] FNAL.

- Knowledge transfer centre at FNAL (2000). URL <https://partnerships.fnal.gov/> [214] SESAME. SESAME, Synchrotron light for experimental science in the Middle East (2003). URL <https://www.sesame.org.jo>
- [215] ESFRI, Guidelines on Cost Estimation of Research Infrastructures (ESFRI, 2019). URL <https://www.esfri.eu/latest-esfri-news/new-study-guidelines-cost-estimation-research-infrastructures-str-esfri>
- [216] European Commission, Commission notice — technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. Tech. Rep. 373 (2021). URL [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021XC0916\(03\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021XC0916(03))
- [217] United Nations. Paris Agreement. United Nations Treaty Collection (2015). URL <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [218] T. ten Raa, Input-Output Economics: Theory and Applications (World Scientific, 2009). URL <https://doi.org/10.1142/6968>
- [219] R. Johnston, K. Boyle, W. Adamowicz, J. Bennett, R. Brouwer, T. Cameron, M. Hanemann, N. Hanley, M. Ryan, R. Scarpa, R. Tourangeau, C. Vossler, Contemporary guidance for stated preference studies. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists 4(2), 319 – 405 (2017). URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ucp:jaerec:doi:10.1086/691697>
- [220] D. Pearce, G. Atkinson, S. Mourato, Cost-benefit analysis and the environment: recent developments (Organisation for Economic Co-operation and development, 2006)
- [221] OECD, Cost-benefit analysis and the environment: further developments and policy use. OECD Publishing, Paris, (2018). URL [https://www.oecd.org/en/publications/cost-benefit-analysis-and-the-environment\\_9789264085169-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/cost-benefit-analysis-and-the-environment_9789264085169-en.html)
- [222] E. Quinet, L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Tech. rep., HAL (2014) [223] HM Treasury and Government Finance Function. HM Treasury guidance on how to appraise and evaluate policies, projects and programmes. the 'green book'. <https://www.gov.uk/government/publications/the-green-book-appraisal-and-evaluation-in-central-government> (2024). URL <https://www.gov.uk/government/publications/the-green-book-appraisal-and-evaluation-in-central-government>
- [224] D. Sartori, G. Catalano, M. Genco, C. Pancotti, E. Sirtori, S. Vignetti, C. Bo, et al., Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020 (Regional and Urban Policy, 2014)
- [225] M. Krogerus, R. Tschäppeler, J. Piening, The Decision Book: Fifty Models for Strategic Thinking, 1st American ed. (W.W. Norton & Co., 2012), p. 173
- [226] T. O'Mahony, Cost-benefit analysis and the environment: The time horizon is of the essence. Environmental Impact Assessment Review 89, 106587 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
- [227] United Nations SDG communication materials. UN web site (2024). URL <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material>
- [228] The SDG transformation center (2024). URL <https://sdgtransformationcenter.org>
- [229] Leadership Council of the Sustainable Development Solutions Network, Indicators and a monitoring framework for the Sustainable Development Goals. Tech. rep., SDSN (2015). URL <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/2013150612-FINAL-SDSN-Indicator-Report1.pdf>
- [230] CERN environment report 2021-2022 - GRI content index (2023). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022/gri-content-index>
- [231] Our World in Data team, SDG tracker: Measuring progress towards the Sustainable Development Goals. Our World in Data (2023). URL <https://ourworldindata.org/sdgs>

- [232] Find out more about the SDGs. KnowSDGs (2024). URL <https://knowsdgs.jrc.ec.europa.eu/sdg/\{1-17\}>
- [233] Meta. Meta sustainability report (2024). URL <https://sustainability.atmeta.com/2024-sustainability-report/>
- [234] European Investment Bank, The economic appraisal of investment projects at the EIB – 2nd edition March 2023 (Publications Office of the European Union, 2022). <https://doi.org/10.2867/076767>
- [235] Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. Web site of UBA (2024). URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>
- [236] Department for Energy Security & Net Zero. Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation. <https://www.gov.uk> (2021). URL <https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>
- [237] National Center for Environmental Economics, Climate Change Division, Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances. Tech. rep., U.S. Environmental Protection Agency (2023). URL <https://www.epa.gov/environmental-economics/scghg>
- [238] European Commission, Better Regulation Guidelines (2021). URL [https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox\\_en](https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox_en). SWD(2021) 305 final
- [239] J. Catalano, M. Da Col, M. Genco, C. Pancotti, A. Tracogna, S. Vignetti. Complementary socio-economic impact analysis of the lepton collider-based research infrastructure. updated assumptions, input data, results and calculations (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14905017>
- [240] F. Bent, B. Nils, R. Werner, Megaprojects and risk: An anatomy of ambition. International Journal of Public Sector Management 17 (2003). <https://doi.org/10.1108/09513550410530199>
- [241] B. Flyvbjerg, in The Sage Handbook of Qualitative Research, ed. by N.K. Denzin, Y.S. Lincoln (Sage Publications, 2011), chap. 17, pp. 301–316
- [242] B. Flyvbjerg, What you should know about megaprojects and why: An overview. Project Management Journal 45 (2014). <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>.
- [243] G. Streicher. Building CERN’s Future Circular Collider. An Estimation of its Impact on Value Added and Employment (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7986138>
- [244] Austrian Institute of Economic Research (WIFO). Policy recommendations to optimise the national returns relating to fcc contributions. <https://www.wifo.ac.at/en/project/268677/> (2024). Accessed: 2025-03-10
- [245] P. Ferreira, et al., in Proceedings of the 17th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2009) (CERN, 2009). URL <https://indico.cern.ch/event/61310/contributions/1228382/>
- [246] A. Gentil-Beccot, S. Mele, T.C. Brooks, Scoap3: The open access initiative for high-energy physics. Insights 27(3), 264–268 (2014). <https://doi.org/10.1629/2048-7754.171>
- [247] L.H. Nielsen, T. Smith, P. Manghi, N. Manola, Zenodo: An open-access repository for everyone. Bulletin of the IEEE Technical Committee on Digital Libraries (2014). URL <https://zenodo.org/record/13006>
- [248] P. Ginsparg, arXiv at 20. Nature 476(7359), 145–147 (2011). <https://doi.org/10.1038/476145a>