

## Projet de Futur Collisionneur Circulaire du CERN : Collision avec la transition écologique



Rapport de Noé21. Version 07.10.2022

Contact : Jean Bernard Billeter [jb.billeter@bluewin.ch](mailto:jb.billeter@bluewin.ch)

# Introduction

Il ne s'agit pas ici de remettre en cause l'existence du Centre Européen de Recherche Nucléaire proprement dit. Sa contribution à la physique des particules est abondante et de première qualité. Des savants et techniciens de toutes origines y collaborent autour d'époustouflantes installations. C'est le plus grand laboratoire du monde.

Ce dont il est question, c'est de l'inopportunité, en pleine crise climatique, du "Futur Collisionneur Circulaire", un projet international dont le CERN poursuit activement l'étude. En effet, si le FCC était réalisé, il nécessiterait le forage d'un tunnel de 100 km et triplerait la consommation actuelle d'électricité du CERN, l'amenant à 4 TWh. Soit plus que le courant de traction de tous les transports publics électriques de Suisse (ensemble des trains, trams, trolleybus, métros, funiculaires et remonte-pente).



Source: <https://cerncourier.com/a/host-states-gear-up-to-work-on-fcc/>

Le cercle **bleu** représente l'actuel LHC, 27 km de circonférence.

Le grand cercle **vert-orange** représente le FCC qui nécessiterait le forage d'un tunnel de 100 km contournant le Salève et de vastes cavernes

Inquiétant? Irrresponsable à l'heure où "chaque kilowattheure compte"? Faut-il vraiment sacrifier au "toujours plus grand, toujours plus puissant" dont les dégâts sont patents et souvent irréversibles?

Avant de nous prononcer, nous avons étudié le projet et tenté, sinon d'en saisir tous les détails, du moins d'en faire le tour. Par honnêteté, par curiosité, par prudence.

Voici quelques éléments de réflexion réunis en cours de route. Ils peuvent servir au débat politique que nous appelons de nos vœux.

# Sommaire

1.	Contexte: les accélérateurs du CERN	3
2.	Le FCC et la région	4
2.1	Gigantisme de l'ouvrage	4
2.2	Calendrier des travaux	5
2.3	Impact du chantier sur la vie de la région	6
3.	Impact environnemental du FCC-ee	7
3.1	Travaux de génie civil	7
	Nappes phréatiques	7
	Émissions de CO <sub>2</sub> liées à la réalisation de l'ouvrage (génie civil)	7
3.2	Équipement technique: fabrication et montage du FCC-ee	9
3.3	Consommation électrique du FCC-ee	10
3.4	Emissions directes de gaz à effet de serre du FCC-ee	10
3.5	Impact radiologique et déchets radioactifs du FCC-ee	11
4.	Impact environnemental du montage et de l'exploitation du FCC-hh	12
4.1	Équipement technique: fabrication et montage du FCC-hh	12
4.2	Consommation électrique du FCCV-hh	12
4.3	Emissions directes de gaz à effet de serre du FCC-hh	13
4.4	Déchets radioactifs du FCC-hh	13
5.	Remarques sur la consommation d'électricité	14
5.1	Consommation d'électricité	14
5.2	Bilan carbone de la consommation d'électricité	15
6.	Bilan carbone de l'ensemble du projet	17
7.	Coût	18
8.	Utilité pour la recherche	19
8.1	L'objectif technique est-il atteignable ?	19
8.2	Les percées scientifiques seront-elles au rendez-vous ?	19
	Qu'en pensent les initiateurs du projet ?	19
	Qu'en pensent les collaborateurs du CERN ?	20
	Qu'en pensent les physiciens ne dépendant pas du CERN ?	20
	Qu'en pensent les organismes suisses de la recherche ?	20
	Qu'en pensons-nous ?	21
8.3	Est-ce, pour la physique, la meilleure manière d'utiliser l'argent public ?	21
9.	Applications pratiques des recherches prévues	21
10.	Retombées technologiques	21
11.	Rapport Utilité sociale/(Coût + Externalités négatives)	22
12.	Scénario catastrophe	23
13.	L'entre-soi décisionnel	23
14.	La communication du CERN sur le FCC	25
15.	Réveil de la "communauté de la physique des particules" ?	27
16.	Est-il prématuré d'intervenir?	28
17.	Le point de vue de noé21	29
	Références	31

# 1. Contexte: les accélérateurs du CERN

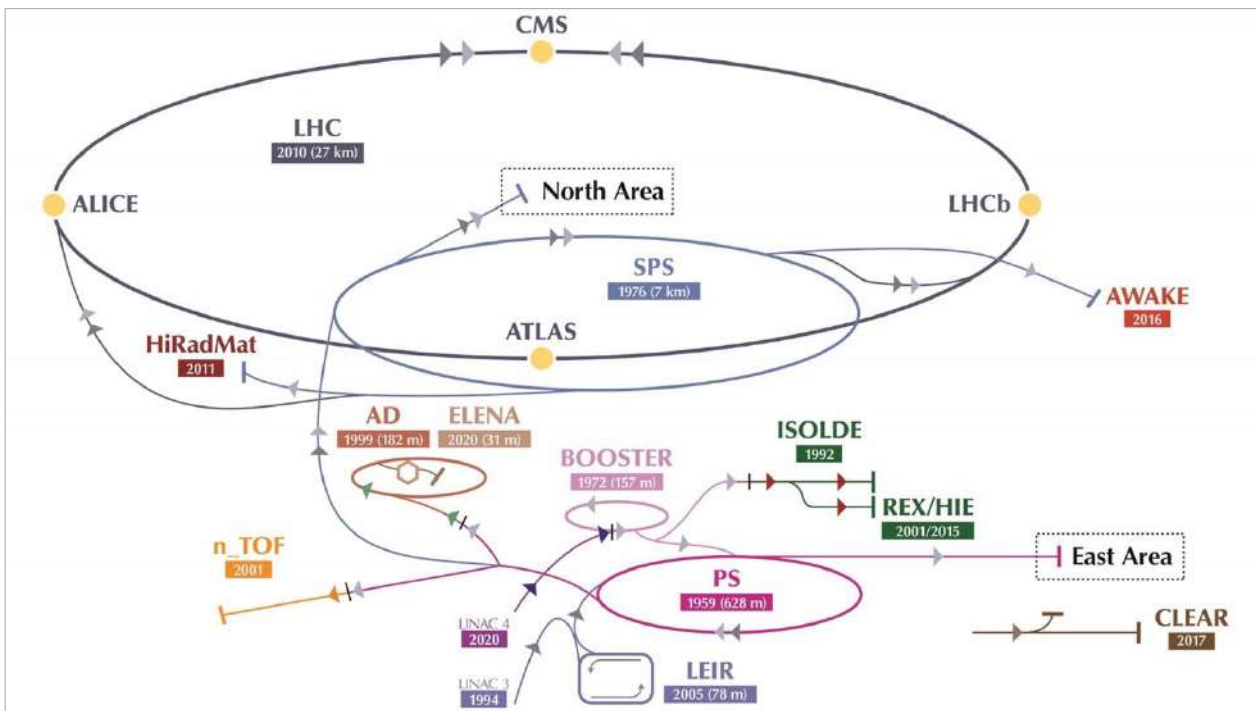
Le CERN construit, exploite et met à disposition des chercheurs des accélérateurs de particules ainsi que les équipements auxiliaires qui leur sont nécessaires. Au fil des ans, il a successivement construit:

	Accélérateur	Énergie de collision	Circonférence
1957	SC Synchrocyclotron (hors service)	600 MeV	15,7 m
1959	PS Proton synchrotron	28 GeV	628 m
1976	SPS Supersynchrotron à protons	400 GeV	6,9 km
1989	LEP Large electron-positron collider (h.s.)	100 GeV	27 km
2000	LEP 2 (h.s.)	209 GeV	27 km
2008	LHC Large Hadron collider	13 TeV	27 km + gros travaux

Ces installations sont régulièrement remises à niveau. D'importants travaux ont été lancés en 2018 pour étendre les dépendances de l'actuel tunnel de 27 km et renforcer le LHC qui deviendra le LHC-hl (haute luminosité):

2029	HL-LHC High-luminosity LHC	13 TeV	27 km + gros travail
------	----------------------------	--------	----------------------

A l'exception du synchrocyclotron de 1957, tous ces accélérateurs sont en fonction. Ils sont interconnectés en un puissant complexe qui constitue "la plus grande machine du monde":

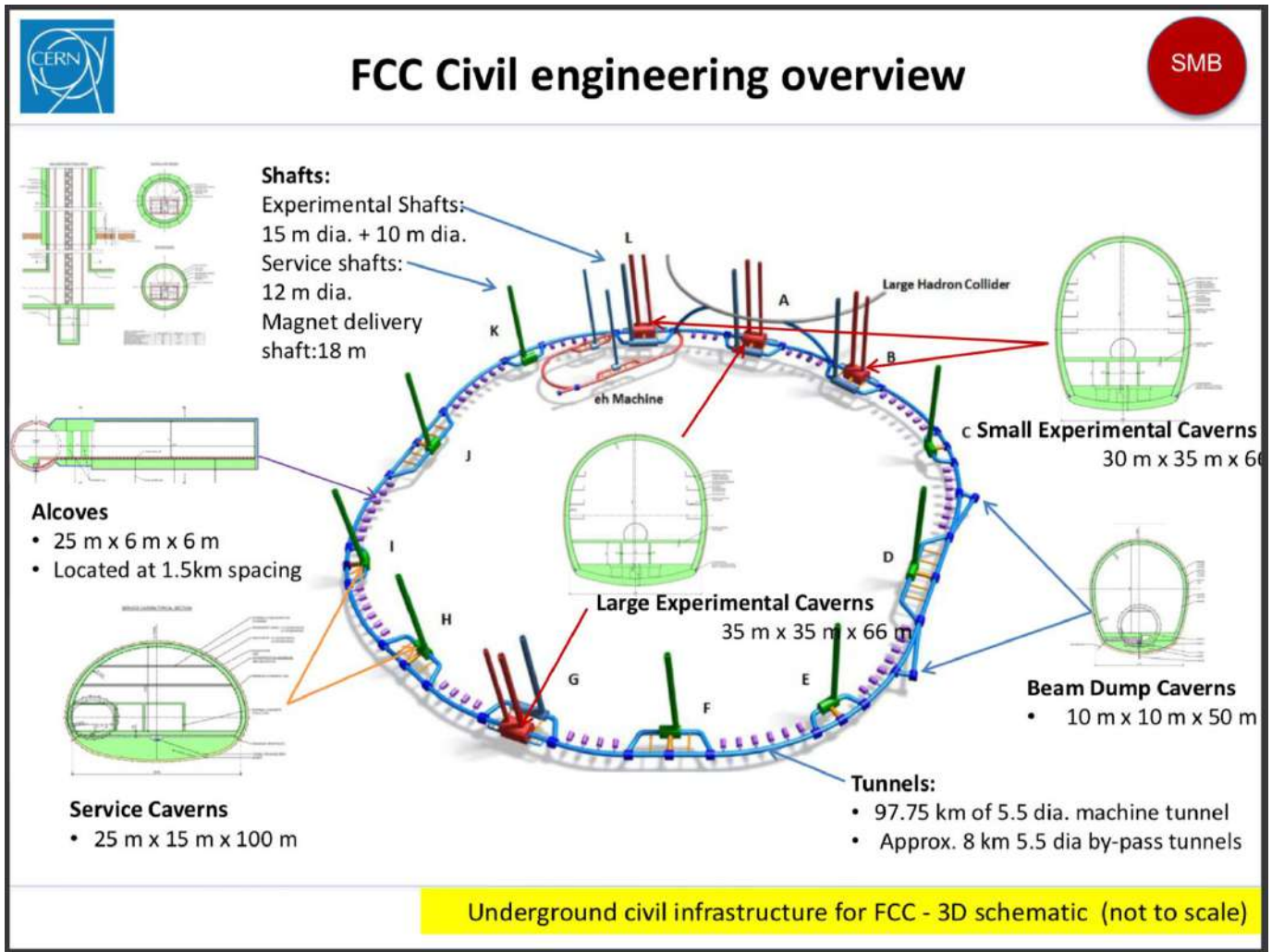


Dans les pages qui suivent, nous nous penchons sur le prochain projet du CERN, le Futur Collisionneur Circulaire. Plusieurs dizaines de millions de francs ont déjà été engagés dans son étude . Au programme: creuser un nouveau tunnel de 100 km qui, dans un premier temps, abritera le FCC e-e, lequel sera ensuite démonté pour faire place au FCC h-h appelé à fonctionner jusqu'à la fin du siècle.

2030	Début du forage du FCC		100 km
2036	Montage des machines		
2039	Entrée en service du FCC e-e	365 GeV	
2065	Entrée en service du FCC h-h	100 TeV	

## 2. Le FCC et la région

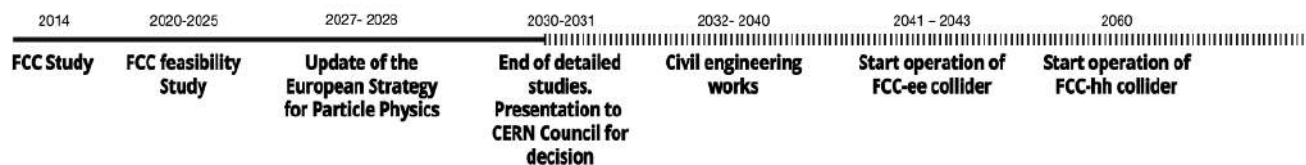
### 2.1 Gigantisme de l'ouvrage



Source: [1]

- "The machine tunnel will be one of the longest tunnels in the world [...]. It will be similar in scope to the recently completed Gotthard Base Tunnel (total of 151.84 km including two 57 km long tunnel tubes) in Switzerland" [2]
- "The underground structures that will be built to host the FCC form part of what will most probably be the biggest tunnelling project in the world when it goes for construction in 2026." [3]
- "[...] additional roads and even tunnels or bridges may be necessary."  
 "[...] it has been assumed a new 5 km long road is required for each surface site."  
 "It is anticipated that each site will be approximately 6 to 9 hectares in size" [2]
- Les travaux de génie civil du FCC-ee étaient estimés en 2018 à CHF 5,4 milliards,  $\pm$  30% [2]

## 2.2 Calendrier des travaux



Source: [4]

Il est important de comprendre que le projet prévoit:

- le forage et l'aménagement du tunnel et de ses importantes dépendances,
- le montage et l'exploitation puis le démontage du collisionneur FCC-ee,
- le montage et l'exploitation du collisionneur FCC-hh, plus volumineux et plus énergivore.

- Le tunnel et ses dépendances sont dimensionnés d'emblée pour recevoir le FCC-hh.

A la date d'écriture (octobre 2022), le projet en est aux **études de faisabilité** qui doivent être rendues fin 2025.

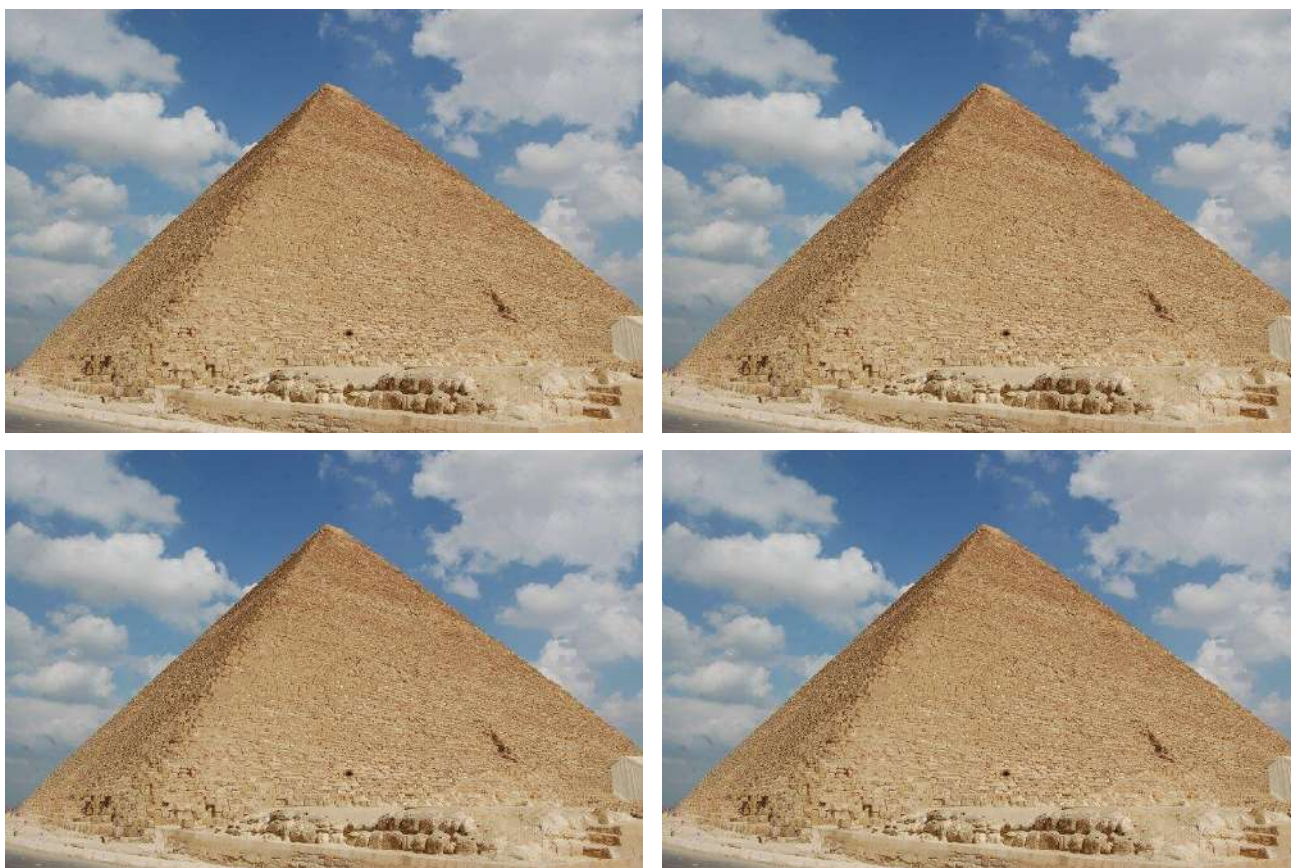
- Elles portent sur la faisabilité géologique, technique, environnementale, administrative et financière.
- Leur budget est de CHF 100 mios. [5] [6]

## 2.3 Impact du chantier sur la vie de la région

Le chantier du tunnel et de ses dépendances souterraines durera environ sept ans. L'ouverture du chantier est prévue pour 2030, avant la fin ou dans la foulée de plusieurs gros chantiers régionaux:

- Place de Cornavin: 2024-2026
- Extension souterraine de la gare: 2026-2030 [7]
- Troisième piste de la N1 entre le Vengeron et l'aéroport: ouverture en 2026 [8]

Le volume des matériaux d'excavation à évacuer est d'environ 9 millions m<sup>3</sup> ... soit 4 pyramides de Chéops. [2]



La masse volumique de la molasse étant de 2,2 tonnes/m<sup>3</sup>, 9 millions m<sup>3</sup> représentent 20 millions de tonnes.

Actuellement, les chantiers genevois produisent 2,6 millions de tonnes de matériaux d'excavation non pollués par an. "Or, à l'heure actuelle, moins de 15% de ces matériaux d'excavation non pollués sont recyclés". 32% sont exportés, 53% sont évacués dans les gravières. On connaît les nuisances engendrées par le trafic de poids lourds chargés de ces transports. [9]

Un concours d'idées (Mining for the future) a été lancé pour trouver des "solutions durables pour la réutilisation de molasse et autres matériaux d'excavation." (voir "Un exemple de communication créative", chapitre 14) [10]

Les autorités sont au courant du projet et l'accompagnent. Les habitants de la région, eux, n'en sont pas conscients.

## 3. Impact environnemental du FCC-ee

### 3.1 Travaux de génie civil

*"Le projet de FCC sera soumis à une étude transfrontalière de l'impact sur l'environnement. [...] les autorités compétentes suisses, fédérales et genevoises, et françaises travaillent avec le CERN pour développer un processus d'évaluation environnementale, qui suivra l'évolution du scénario de projet FCC depuis la phase de conception jusqu'à la phase d'autorisation, et au-delà.. [...]"*

*Cette évaluation environnementale suivra une approche pour « éviter- réduire-compenser » (ERC) visant à mettre en œuvre des mesures pour éviter, en priorité, les atteintes à l'environnement, réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits." [11]*

L'approche "Éviter - Réduire - Compenser" est de bonne méthode. Mais n'a-t-on pas sauté l'étape Éviter?

Les études d'impact sur l'environnement nécessaires à l'obtention des permis de construire font partie des études de faisabilité en cours. On n'en connaît pas encore la liste détaillée, ni les exigences. Des discussions sont en cours entre le CERN et les deux États hôtes – la Suisse et la France – dont les lois et règlements diffèrent.

Elles porteront, entre autres, sur le positionnement exact du tunnel, la protection des nappes phréatiques, le traitement des produits d'excavation, les rayonnements ionisants, la qualité de l'air, le bruit, les déchets radioactifs, ainsi que l'impact sur la faune, la flore et l'agriculture des sites de surface qui occuperont plusieurs dizaines d'hectares. A la date d'écriture (octobre 2022), aucune loi ni aucun règlement n'impose au CERN d'évaluer et de faire connaître l'impact climatique de son projet.

#### Nappes phréatiques:

*"Also, no relevant conflicts with underground water layers or hydrocarbons could be identified and puncture of protected water reservoirs can be avoided with an optimised layout and placement. [...] However, the current, first preliminary placement (tracé du tunnel et de ses annexes) does not meet all requirements and constraints at the same time (technical requirements, lepton and hadron collider optimised layout, environmental exclusion zones, socio-urbanistic constraints)." [2]*

On n'est donc pas encore certain de pouvoir loger un tel ouvrage dans notre sous-sol.

#### Émissions de CO<sub>2</sub> liées à la réalisation de l'ouvrage:

Une première évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la réalisation du tunnel ainsi que des puits, galeries, cavernes et alcôves y attenantes doit au minimum prendre en compte les émissions provenant des activités suivantes:

1. Excavation (tunnelier, abatage à l'explosif, etc.)
2. Évacuation des débris d'excavation (9 à 10 mios m<sup>3</sup> soit plus de 20 mios de tonnes) aux portes du chantier
3. Évacuation de ces débris vers leur dépôt final ou vers leurs points de valorisation
4. Production du béton
5. Production de l'acier de ferrailage
6. Mise en œuvre du béton
7. Exploitation du chantier (éclairage, ventilation, traitement des eaux...)

Ce type de calculs a déjà fait l'objet de publications et de normes dans plusieurs pays. Le CERN, lui, ne s'est pas exprimé sur la question. Le fait que le cahier des charges des études de faisabilité [5] n'en parle pas et que nulle part n'y figure le mot "climat" suggère que le CERN ne fournira ce chiffre essentiel que si les autorités l'exigent.

Nous avons tenté une estimation en nous inspirant du travail de Julia Sauer: "*Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur*" [12]. Méthode: inventorier le volume des différents matériaux mis en œuvre ainsi que la consommation des différents vecteurs énergétiques, les multiplier par leurs facteurs respectifs d'émissions de CO<sub>2</sub> et additionner le tout. Le travail prend pour exemple la construction en cours du tunnel ferroviaire de base du Brenner entre l'Italie et l'Autriche. Ses calculs débouchent (entre autres) sur deux chiffres:

- a) un facteur d'émissions par mètre de tunnel: 30 t eq CO<sub>2</sub> / m (t eq CO<sub>2</sub>: tonnes équivalent CO<sub>2</sub>) (p96, ill. 4.1)
- b) un facteur d'émissions par m<sup>3</sup> d'excavation: 0,16 t eq CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> (p96)

Appliqués à l'ouvrage du FCC, ces facteurs donnent:

- a) 100'000 m · 30 t eq CO<sub>2</sub>/m = 3'000'000 t eq CO<sub>2</sub>
- b) 9'000'000 m<sup>3</sup> · 0,16 t eq CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> = 1'440'000 t eq CO<sub>2</sub>

Les similitudes entre le tunnel de base du Brenner et l'ouvrage du FCC sont suffisantes pour considérer ces résultats (même si les débris d'excavation du Brenner sont aisément évacuables par les portails alors que ceux du FCC devront être remontés par des puits).

En 2001, R. Rodriguez et F. Perez ont publié une étude du même type, "*Carbon foot print evaluation in tunneling construction using conventional methods*" [13]. Ne disposant pas des données permettant d'en exploiter tous les calculs, nous nous sommes contentés d'évaluer les points 4 et 5 (béton et acier de l'ouvrage) des 7 points qui devraient être pris en compte. Nous obtenons:

- c) 9'000'000 m<sup>3</sup> de tunnel de 90 m<sup>2</sup> de section: 1'200'000 t eq CO<sub>2</sub>

Nous poursuivons notre réflexion avec le chiffre de 1'440'000 arrondi à 1'400'000 [14]:

**Émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'excavation et au bétonnage de l'ouvrage du FCC: 1,4 mio t eq CO<sub>2</sub>**

Dans un récent article intitulé "*The carbon footprint of proposed e+e- Higgs factories*" [15], Patrick Janot et Alain Blondel, tous deux physiciens travaillant au CERN, proposent un chiffre très inférieur: 250'000 à 300'000 t eq CO<sub>2</sub>. Ils se réfèrent pourtant à la méthode de R. Rodriguez et F. Perez qui nous a conduits au résultat très différent de 1'200'000 t eq CO<sub>2</sub> ...

Janot et Blondel confortent leur estimation en citant le chiffre de 221'000 t CO<sub>2</sub> avancé par huit physiciens et physiciennes dans "*Climate impacts of particle physics*" [16]. Sans véritable explication, ces auteurs ramènent le volume des excavations de 9 à 7 millions de m<sup>3</sup> et précisent que leur chiffre (237'000 t) ne porte que sur le CO<sub>2</sub> imputé au ciment employé par l'ouvrage. Se référant à leur tour à l'étude de Rodriguez, ils estiment – sans calcul – que, si l'on tenait compte des autres facteurs impliqués (fer, carburant, électricité...), les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'ouvrage seraient de l'ordre de 500'000 à 1'000'000 tonnes.

Dans l'attente de nouveaux calculs, nous nous en tiendrons à 1,4 mios tonnes.

## 3.2 Equipement technique: fabrication et montage du FCC-ee

Le "Conceptual Design Report Volume 2" [2] classe ainsi les éléments du système technique FCC-ee:

*Machine proprement dite:*

1. Main magnet system
2. Vacuum system and electron cloud mitigation
3. Radiofrequency system
4. Beam transfer systems
5. Combined polarimeter and spectrometer
6. Halo collimators
7. Machine protection
8. Controls requirements and concepts
9. Detectors

*Plus les infrastructures techniques en grande partie extérieures:*

10. Piped utilities
11. Heating, ventilation, air conditioning
12. Electricity distribution
13. Emergency power
14. Cryogenic system
15. Equipment transport and handling
16. Personnel transport
17. Geodesy, survey and alignment
18. Communication, computing and data services
19. Safety and access management systems

Impossible, sur la base des informations disponibles, de calculer l'empreinte CO<sub>2</sub> de la fabrication et du montage de cet équipement.

Risquons toutefois quelques estimations pour discerner les ordres de grandeur.

Aimants:

Il est prévu [2] d'équiper le FCC-ee entre autres de

2900 aimants dipôles de courbure contenant chacun 5'000 kg de fer (ou acier) et 440 kg d'aluminium (longueur ~ 25 m),

2900 aimants quadripôles de focalisation contenant chacun 4'400 kg de fer (ou acier) et 820 kg de cuivre (longueur ~ 3 m)

Bout à bout, ces aimants occupent  $(2'900 \cdot 25) + (2'900 \cdot 3) = \sim 84$  km, soit l'essentiel du tunnel.

Poids total des aimants: ~31'000 tonnes

décomposables en 27'260 t de fer, 1'334 t d'aluminium et 2'378 t de cuivre.

En prenant pour facteur d'émission respectif de ces 3 matériaux 2,4, 0,5, et 7,1 t eq CO<sub>2</sub> / t [17], on obtient un plancher des émissions liées à ces matériaux (plancher parce que ces aimants comprennent encore d'autres matériaux) de:

- Équivalent CO<sub>2</sub>:  $(27'600 \cdot 2,4)_{\text{acier}} + (1'334 \cdot 0,5)_{\text{alu}} + (2'378 \cdot 7,1)_{\text{cuivre}} = \sim \underline{80'000 \text{ t eq CO}_2}$ .

Détecteurs:

Les études préparant le choix des 2 ou 4 détecteurs du FCC-ee sont en cours. Pour se faire une idée de l'importance de ces installations:

Taille des 2 ou 4 cavernes qui les abriteront: 66 mètres x 35 mètres x 35 mètres.

Pour ce qui concerne leur poids, prenons comme repères les 4 détecteurs de l'actuel LHC:

Atlas: 7'000 tonnes, CMS: 14'000 tonnes, Alice: 10'000 tonnes, LHCb: 5'600 tonnes,

représentent un total de 36'600 tonnes sans les équipements auxiliaires (la Tour Eiffel pèse 7'000 tonnes).

Poids total supposé des détecteurs du FCC-ee: 35'000 tonnes.

Leur matériaux sont très différents de ceux des aimants. Attribuons leur un coefficient t eq CO<sub>2</sub> de 5.

- Équivalent CO<sub>2</sub>:  $35'000 \cdot 5 = \underline{175'000 \text{ t eq CO}_2}$ .

Aimants + détecteurs:

Nous aurions donc ensemble  $31'000 + 35'000 = 66'000$  tonnes d'équipement aux matériaux desquels on peut imputer des émissions de  $80'000 + 175'000 = 255'000$  t eq CO<sub>2</sub>. A cela s'ajoutent 5 années de chantier de montage de l'équipement. Estimation: 500'000 t eq CO<sub>2</sub>.

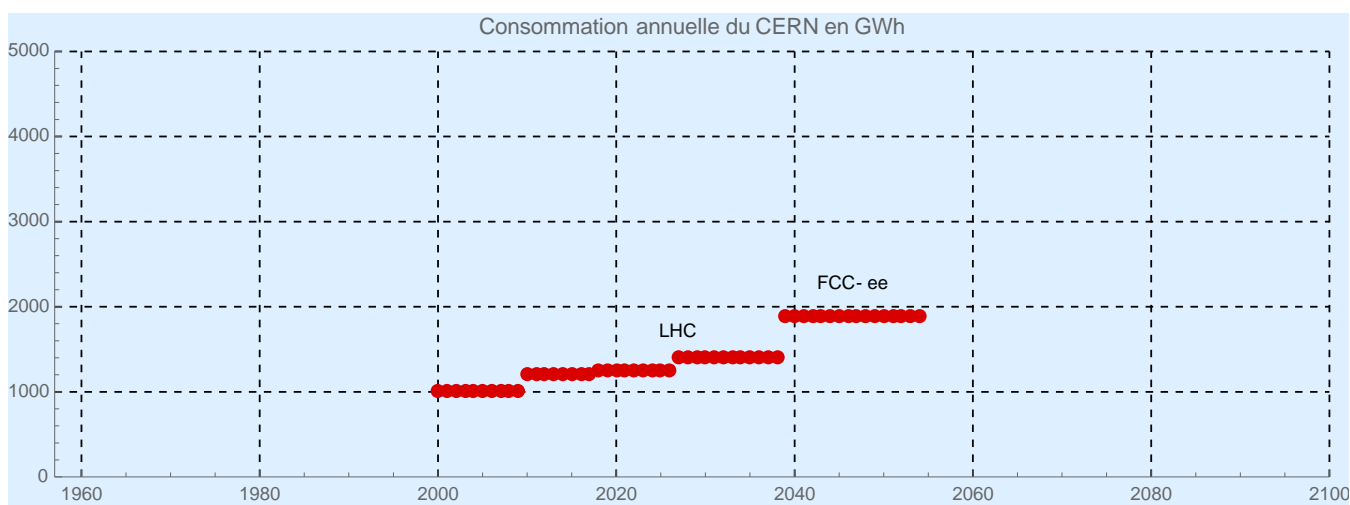
Émissions de CO<sub>2</sub> liées à la construction et au montage de ces équipements du FCC-ee  $> 255'000 + 500'000 = \underline{755'000 \text{ t eq CO}_2}$  Comme le FCC-ee comprend bien d'autres éléments, nous arrondissons prudemment ce chiffre:

Émissions liées à la construction et au montage des équipements du FCC-ee:

1'000'000 t eq CO<sub>2</sub>

### 3.3 Consommation électrique du FCC-ee

Avec le FCC-ee, la consommation du CERN passerait de 1,4 TWh (LHC-hl) à 1,9 TWh [2]. Commentaires au chapitre 5.



### 3.4 Émissions de gaz à effet de serre du FCC-ee

L'actuel accélérateur, le LHC, est ...

*"... le plus imposant système cryogénique du monde et représente l'un des endroits les plus froids de la Terre. La température de fonctionnement des principaux aimants du LHC, 1,9 K (-271,3°C) est inférieure à celle de l'espace intersidéral, 2,7K (-270,5°C). Le système de cryogénie du LHC nécessite 40 000 joints de tuyauterie étanches, une alimentation électrique de 40 MW - soit dix fois plus que la puissance nécessaire à une locomotive – et 120 tonnes d'hélium pour maintenir les aimants à 1,9 K." [18]*

C'est impressionnant et, dans le contexte du dérèglement climatique, inquiétant. On sait que les gaz fluorés ont un effet de serre plusieurs centaines ou milliers de fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>.

*" Les émissions directes de GES du CERN (...) sont principalement liées à l'utilisation de gaz fluorés pour la détection de particules et le refroidissement des détecteurs dans les grandes expériences du LHC." [19]*

En 2018, alors que le LHC et ses détecteurs fonctionnaient à plein régime, les installations du CERN ont dissipé quelque 190'000 t eq CO<sub>2</sub> de gaz fluorés. [t eq CO<sub>2</sub>: tonnes équivalent CO<sub>2</sub> ]

*"Pour optimiser l'utilisation de gaz dans les détecteurs, le CERN a élaboré une stratégie de R&D fondée sur quatre piliers : la récupération, la réduction, l'optimisation des technologies actuelles et le remplacement par des gaz plus écologiques." [19]*

Il est difficile d'estimer l'importance des émissions qu'aurait le FCC-ee. Les techniques de prévention des fuites auront certainement progressé. Mais, quels que soient les efforts et les progrès, l'ajout au complexe existant (voir ill. p. 2) d'installations de la taille du FCC-ee pourrait se traduire par une augmentation nette des émissions de gaz à effet de serre. Risquons un chiffre:

Émissions de t eq CO<sub>2</sub> liées aux fuites de F gaz du FCC-ee: 200'000 tonnes CO<sub>2</sub>/an

Remarque: Ce chiffre ne concerne que le FCC. Le LHC et les autres installations continueront de dissiper des Fgaz

Piste également étudiée par le CERN: des substituts aux gaz fluorés. Se posent toutefois des questions de coût, de performances et de disponibilité:

*"La demande et l'innovation en matière de technologies de substitution sont freinées par des dysfonctionnements du marché, car les répercussions des gaz fluorés sur le climat ne sont actuellement pas incluses dans les prix." [20]*

### 3.5 Impact radiologique des FCC et déchets radioactifs du FCC-ee

Impact radiologique:

- *"The potential sources for environmental radiological impact are identical to those for the LHC:*

- 1) *dose from stray radiation emitted during beam operation,*
- 2) *dose from radiation emitted by radioactive materials and waste,*
- 3) *operation of sources and X ray emitting devices and*
- 4) *the dose from release of activated water and air.*

*Safeguards will be included in the design of the accelerator infrastructure to control the impact on the environment.*

*Dedicated monitoring systems and procedures will ensure continuous parameter recording and auditing throughout the entire operational phase of the facility and will facilitate the control of the impact." [2]*

Déchets radioactifs du FCCV-ee [2]:

	<i>Déchets de très</i>	<i>Déchets de moyenne</i>
	<i>faible activité</i>	<i>et faible activité</i>
• <b>Déchets résultant du chantier</b>	0	0
• <b>Déchets résultant du fonctionnement</b>		
<b>Injectors</b>	< 250 m <sup>3</sup> /an	< 10 m <sup>3</sup> /an
<b>Collider (including top-up ring)</b>	< 1450 m <sup>3</sup> /an	< 70 m <sup>3</sup> /an

Pour un point de comparaison chiffré, voir la section 4.4.

## 4. Impact du montage et de l'exploitation du FCC-hh

### 4.1 Équipement technique: fabrication et montage du FCC-hh

Lorsque le programme de recherche du FCC-ee sera bouclé (2058), l'accélérateur-collisionneur sera démonté et remplacé par le FCC-hh. Une partie de l'infrastructure ayant servi au FCC-ee pourra être maintenue. Plus puissant, plus volumineux, le FCC-hh utilisera des aimants supraconducteurs devant être maintenus à 1,9 K.

On dispose ici d'un chiffre, celui de la "masse froide", somme du matériel maintenu près du zéro absolu: 230'000 tonnes. A quoi on peut ajouter 10% pour les cryostats. [21]

D'où il ressort qu'un accélérateur-collisionneur de cette taille pèse ~ 250'000 tonnes, sans compter ses annexes.

Admettons pour fixer les idées que le FCC-hh et ses annexes immédiates pèsent 300'000 tonnes. Le facteur d'émission moyen de cette machine est vraisemblablement supérieur à 2 t eq CO<sub>2</sub> / t. Ce qui donne pour sa construction quelque 600'000 t eq CO<sub>2</sub>.

Le FCC-hh nécessitera de nouveaux détecteurs. Le modèle actuellement à l'étude, d'un diamètre de 20 m, est long de 50 m. A combien s'élèvent les émissions de CO<sub>2</sub> liées à leur construction et leur montage? Proposons 200'000 t eq CO<sub>2</sub>.

A cela s'ajoutent 5 années de démontage du FCC-ee et de montage du nouvel équipement. Estimation: 500'000 t eq CO<sub>2</sub>.

Émissions de CO<sub>2</sub> liées à la construction et au montage des équipement du FCC-hh

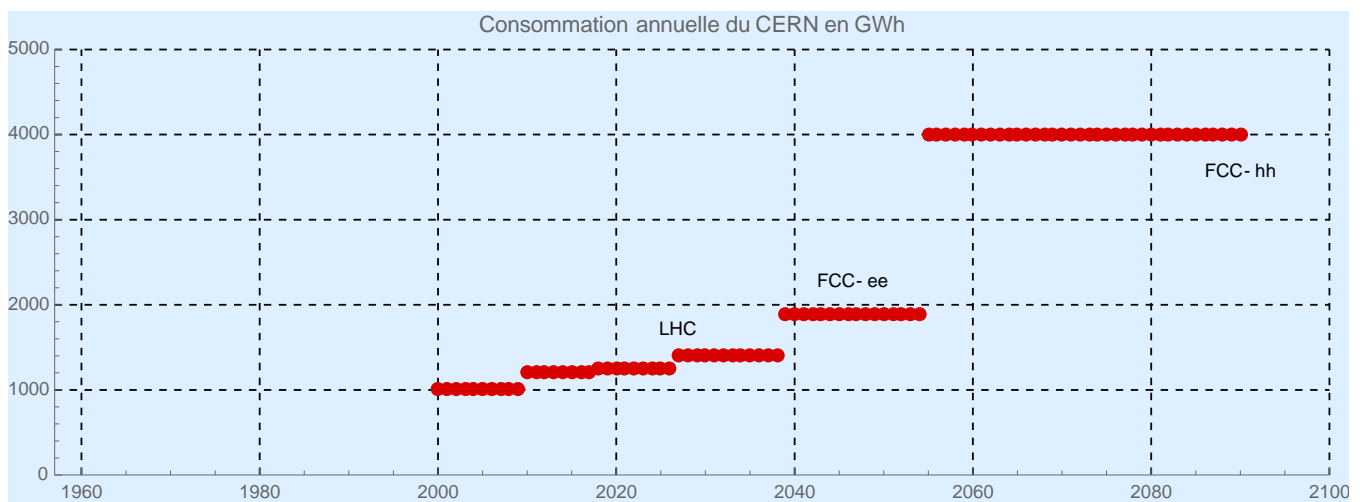
1'300'000 tonnes CO<sub>2</sub>

Nos estimations devraient permettre d'ouvrir la discussion. Attention: Elle mettent surtout en évidence le point suivant:

**Il appartient au CERN de calculer les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> liées à ses projet de FCC-ee et FCC-hh. C'est à lui de fournir les chiffres permettant la comparaison avec les efforts entrepris ailleurs pour réduire notre empreinte carbone. On comprendrait mal que les CHF 100 mios alloués aux études de faisabilité de ce mégaprojet ne couvrent pas l'analyse de son impact climatique.**

### 4.2 Consommation électrique du FCC-hh

Avec le FCC-hh, la consommation du CERN passerait de 1,9 TWh (FCC-ee) à 4 TWh [21]. Commentaires au chapitre 5.



### 4.3 Émissions de gaz à effet de serre du FCC-hh

Le FCC-hh laisserait-t-il filer dans l'atmosphère moins de gaz à effet de serre que l'actuel LHC (voir 3.3)? La démonstration reste à faire. Faut-il compter sur une réduction des pertes des gaz à effet de serre par rapport au FCC-ee? C'est au CERN de le démontrer.

Émissions de t eq CO <sub>2</sub> liées aux fuites de F gaz du FCC-hh:	200'000 tonnes CO <sub>2</sub>
--	--------------------------------

### 4.4 Déchets radioactifs du FCC-hh

Déchets radioactifs FCC-hh:

	Déchets de très faible activité	Déchets de moyenne et faible activité
• Déchets résultant du chantier	5000 m <sup>3</sup>	200 m <sup>3</sup> (conversion du SPS en injecteur)
	300 m <sup>3</sup>	900 m <sup>3</sup> (conversion du LHC en injecteur)
• Déchets résultant du fonctionnement		
Injectors (including LHC)	650 m <sup>3</sup> /an	30 m <sup>3</sup> /an
Collider	1450 m <sup>3</sup> /an	70 m <sup>3</sup> /an

Pour situer ces chiffres (qui ne comprennent pas l'ensemble des matières irradiées), notons que la capacité actuelle de réception, traitement et évacuation des déchets radioactifs du CERN est d'environ 400 m<sup>3</sup> par an.

On voit que le FCC-ee en produira 1700 m<sup>3</sup> par an, le FCC-hh 2100 m<sup>3</sup> par an (sans compter les 6400 m<sup>3</sup> de déchets du chantier de démontage du FCC-ee lorsque ce dernier cédera la place au FCC-hh) [21]

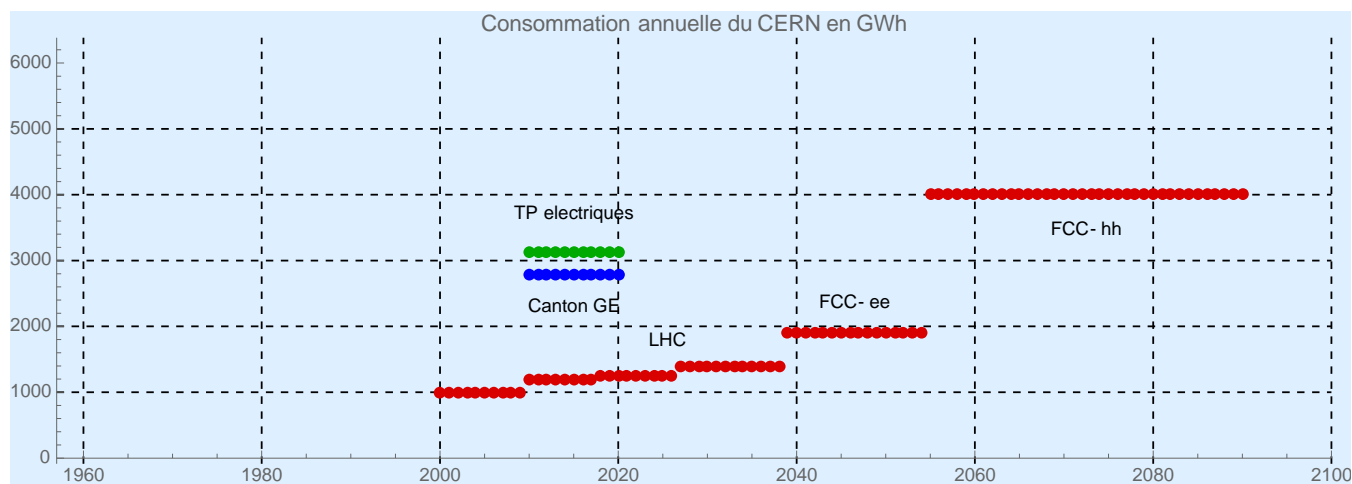
## 5. Remarques sur la consommation d'électricité

### 5.1 Consommation d'électricité

Le CERN consomme actuellement 1,3 TWh par an. En 2019, sa facture d'électricité était de l'ordre de CHF 60 millions/an, à tarif favorable.

Le FCC-hh multiplierait cette consommation par plus de trois:

- *"The current estimate of the energy consumption [du CERN équipé FCC-hh] is 4 TWh per year, which is a factor 3 times higher of what we are consuming today"* Fabiola Gianotti, directrice du CERN [22]



Rouge: consommation actuelle du CERN et celle qu'il aurait avec le FCC-ee puis le FCC-hh

Bleu: consommation du canton de Genève moyennée sur les années 2010-2020

Vert: consommation de courant de traction de l'ensemble des transports publics électriques suisses (trains, trams, trolleybus, etc.) moyennée sur les années 2010-2020

Les chiffres de consommation du CERN de 1957 à 1999 ne sont pas disponibles. Les chiffres à partir de 2020 sont des prévisions annuelles moyennées sur toute la durée d'exploitation des installations, arrêts techniques compris. Cela explique leur allure en plateaux.

L'extravagante consommation des accélérateurs n'a pas échappé aux chercheurs. Lors d'un symposium sur la Stratégie européenne de la physique des particules, un orateur concluait:

- *"This puts accelerators into the range where they become relevant for society and public discussion."* [23]

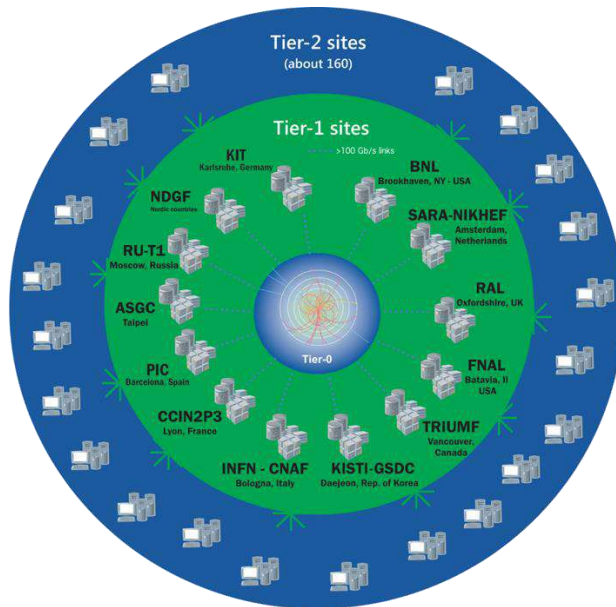
Jorgen D'Hondt, du Comité européen sur les futurs accélérateurs, constate que, pour ce qui concerne le FCC:

- *"The big elephant is power consumption"* [24]

Par ailleurs, le CERN exploite aujourd'hui déjà **le plus grand réseau de calcul au monde, le WLCG**, "Grille de calcul mondiale pour le LHC" regroupant 1,4 million de cœurs de processeurs et 1,5 exaoctets de stockage, mobilisant plus de 170 sites répartis dans 42 pays afin de:

*"...fournir les ressources informatiques nécessaires pour stocker, distribuer et analyser les données produites par le LHC.*

*La Grille WLCG combine les ressources informatiques d'environ 900'000 cœurs de processeurs provenant de plus de 170 sites répartis dans 42 pays."* [25]



Aujourd'hui, le CERN fournit environ 20% des ressources de la Grille (Tier-0 sur l'illustration). Il ne s'impute pas la consommation électrique du 80% restant qui pourtant mouline pour interpréter les données de ses expériences.

Les ressources informatiques nécessaires au FCC seront **X** fois plus grandes. Leur consommation électrique **Y** fois supérieure à la consommation actuelle. La valeur de **X** et de **Y** n'est pas connue.

## 5.2 Bilan carbone de la consommation d'électricité

Le principal fournisseur du CERN, EDF, "utilise de l'électricité à faible émission de carbone, d'origine principalement nucléaire." [19]

Le terme "faible émission" reflète le fait que le courant français est à 80% d'origine nucléaire et que 1 MWh électrique français n'émettrait environ que 0,1 t eq CO<sub>2</sub>. [26]

Si l'on croit ce chiffre (ne comprenant pas le démantèlement des centrales, la construction des cavernes d'enfouissement, le conditionnement des déchets, le transport en cavernes et leur suivi sur plus de 100'000 ans), les émissions de CO<sub>2</sub> imputables à la consommation d'électricité du CERN – FCC-ee s'élèvera à 190'000 t eq CO<sub>2</sub> par an, et du CERN – FCC-hh à 400'000 t eq CO<sub>2</sub> par an.

(1 MWh → 0,1 t; 1 GWh → 100 t; 1 TWh 100'000 t; 4 TWh → 400'000 t)

Le chiffre réel sera très supérieur pour deux raisons:

1) Selon le vol. 2 des rapports conceptuels, la couverture des besoins électriques du CERN sera assurée par le réseau européen.

Or le MWh électrique européen moyen produit environ 0,45 t eq CO<sub>2</sub> [26]. Ce qui donnerait:

**Bilan carbone de l'électricité CERN – FCC-ee: 855'000 t eq CO<sub>2</sub> / an pendant 15 ans d'exploitation: 12'825'000 t eq CO<sub>2</sub>**

**Bilan carbone de l'électricité CERN – FCC-hh: 1'800'000 t eq CO<sub>2</sub> / an pendant 35 ans d'exploitation: 63'000'000 t eq CO<sub>2</sub>**

2) Ce facteur de 0,45 est à son tour trop faible. En effet, il s'applique à l'utilisateur standard, c'est-à-dire qui n'a pas d'influence sensible sur le marché. Mais lorsque le CERN soustrait au réseau interconnecté européen l'énorme courant dont il a besoin, les fournisseurs d'électricité, pour répondre à la demande des autres clients, réenclenchent les centrales d'appoint, dont les centrales fossiles.

- *" As many countries [...] rely on imported electricity to meet their demand, the greenhouse gas content of electricity imports must be correctly accounted for. By assuming an average GHG content for each amount imported, impacts of electricity required in peak periods are underestimated because additional (marginal) demand is primarily met with fossil power plants. [27]*

On rétorquera que le bilan carbone de la consommation électrique sera progressivement moindre que suggéré ci-dessus en raison d'une augmentation de la part d'électricité décarbonée. Souhaitons-le!

Cependant: la production d'électricité décarbonée requiert à son tour la construction d'installations (éoliennes, photovoltaïque, etc.), construction dont on ne peut ignorer l'impact carbone. C'est en particulier et lourdement le cas pour les centrales nucléaires que la France semble vouloir construire pour assurer sa transition énergétique.

Nous suivrons avec intérêt la question des scénarios d'évolution du facteur d'émissions de CO<sub>2</sub> de l'électricité. Pour l'instant, nous nous en tenons à l'actuelle moyenne européenne de 0,45 t eq CO<sub>2</sub>. Si le CERN juge ce coefficient exagéré, à lui d'en présenter la courbe d'évolution de 2030 à 2100, à travers la succession des crises qui nous attendent.

## 6. Bilan carbone de l'ensemble du projet

Si l'on ignore les études préalables (plus de dix ans), le projet peut être décomposé en 5 étapes caractérisées par les chiffres suivants:

Chiffres en rouge: chiffres du CERN, en marron: nos estimations.

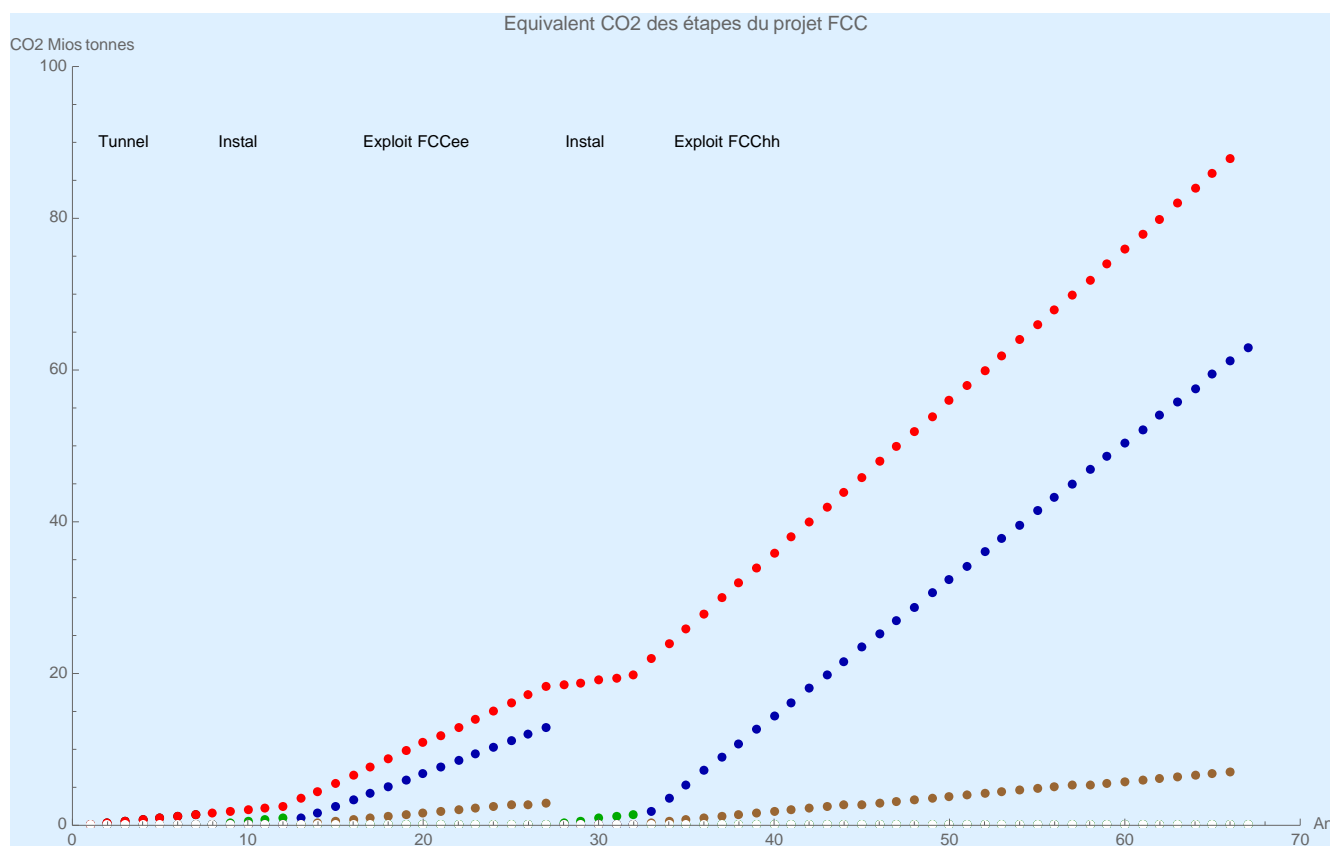
	Durée	Conso électr.	Empreinte CO <sub>2</sub>	Empreinte CO <sub>2</sub> totale
		annuelle [GWh]	annuelle [mio t eq]	de l'étape [mio t eq]
1. Tunnel et ses annexes <sup>1</sup>	7 ans			1,4
2. Fabrication + montage du FCC-ee <sup>2</sup>	5 ans			1,0
3. Exploitation du FCC-ee <sup>3</sup>	15 ans	1'900	0,86 (élec) 0,2 (Fgaz)	12,8 (élec) 3 (Fgaz)
4. Démontage FCC-ee, fab. + montage CC-hh <sup>2</sup>	5 ans			1,3
5. Exploitation du FCC-hh <sup>3</sup>	35 ans	4'000	1,8 (élec) 0,2 (Fgaz)	63 (élec) 3 (Fgaz)

1) Forage et stabilisation (béton, acier) du tunnel et de ses annexes

2) Fabrication et montage

3) Coefficient de conversion électricité-carbone: 0,00045 t eq CO<sub>2</sub>/Gwh (= moyenne européenne) & équivalent CO<sub>2</sub> des F-gaz

L'empreinte carbone cumulée de ces 5 étapes prend l'allure suivante:



Rouge: Cumul des impact en millions de tonnes équivalentes de CO<sub>2</sub> du projet de FCC, du premier coup de pioche à la fin du siècle

Vert: Impact carbone de la construction et du montage des équipements du FCC-ee puis du FCC-hh

Bleu: Impact carbone de la consommation d'électricité du FCC-ee, puis du FCC-hh

Brun: Impact carbone des fuites de gaz fluorés du FCC-ee puis du FCC-hh

Quelles que soient les imprécisions de nos estimations sur l'impact CO<sub>2</sub> des postes très lourds que sont le chantier, les équipements et les fuites de F gaz, le facteur le plus extravagant est celui de la consommation électrique.

Les 85,5 mios de t eq CO<sub>2</sub> qu'émettrait le projet FCC sur 67 ans (1930 - 1996) correspondent aux émissions totales de > 100'000 habitants suisses (électricité, chauffage, mobilité, activités, etc.), durant les mêmes 70 ans... (actuellement 12 tonnes par personne, entreprises et administration comprises).

## 7. Coût

Coût du projet selon [2] pour le FCC-ee, selon [21] pour le FCC-hh, et selon nos prudentes estimations pour les coûts d'exploitation:

Estimation du coût du <b>FCC-ee</b> (en 2018, à ± 30% [2])			<b>GCHF</b>
génie civil	5,4	}	
infrastructure technique	2,0	}	Total: <b>10,5</b>
collisionneur et ses injecteurs	3,1	}	
+ option "tt̄ working point"			<b>1,1</b>
Coût d'exploitation sur 14 ans (notre estimation*)			<b>14</b>

Estimation du coût du <b>FCC-hh</b> (en 2018, à ± 30% [21])			
(étant entendu que le FCC-ee aura déjà été construit)			
génie civil	0,6	}	
infrastructure technique	2,8	}	Total: <b>17</b>
collisionneur et ses injecteurs	13,6	}	
Coût d'exploitation sur 25 ans (notre estimation*)			<b>25</b>
<b>Grand total</b>			<b>68</b>

\*) Basée sur le précédent du LHC: "Les coûts du LHC pendant l'exploitation (coûts directs et indirects) représentent environ 80 % du budget annuel du CERN pour les opérations, la maintenance, les arrêts techniques, les réparations et les travaux de consolidation, en personnel et en matériel (pour la machine, les injecteurs, l'informatique et les équipements)". Le budget actuel du CERN est d'environ CHF 1,2 milliard par année. [28]

- Le montage financier du projet fait partie des études de faisabilité actuellement en cours.
- Les dépenses sont réparties entre les 23 pays membres et d'autres partenaires internationaux. Les pays hôtes (Suisse et France) seront invités à consentir un effort particulier.
- Le projet repose sur des avancées technologiques non confirmées. On peut s'attendre à des surprises.
- Rappelons que la construction du LHC, initialement budgétée à CHF 2,6 milliards, en a coûté 10.

## 8. Utilité pour la recherche

Le projet de FCC vise un objectif technique (un collisionneur) devant permettre d'importantes percées scientifiques.

- *"La mission du FCC sera de repousser les frontières de l'énergie et de l'intensité des collisionneurs de particules, le but étant d'atteindre des énergies de collision de 100 TeV, dans la perspective de la recherche d'une nouvelle physique."* [29]

### 8.1 L'objectif technique est-il atteignable ?

Les études de faisabilité sont en cours. Remarquons toutefois que les ingénieurs n'ont pas pour habitude de laisser filer des projets aussi passionnants, même si le doute plane sur leur faisabilité. Lorsqu'un financement semble assuré, ils parlent de "défi" et foncent. Parfois ils s'enfoncent (l'EPR finlandais d'Areva, Iter, les déchets nucléaires...), bien souvent ils explosent le budget initial.

### 8.2 Les percées scientifiques seront-elles au rendez-vous ?

**Qu'en pensent les initiateurs du projet? Éléments de réponse:**

Le FCC doit essentiellement permettre...

- ... de pousser l'étude du boson de Higgs et de l'utiliser à son tour dans de nouvelles réactions;
- ... d'éventuellement trouver de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes liés à la matière noire;
- ... d'effectuer des mesures beaucoup plus précises, ce qui, avec les nouvelles méthodes de calcul, permettra de dégager une quantité sur-proportionnelle d'informations.

Les initiateurs ne sont toutefois pas certains de trouver ce qu'ils cherchent – ni même de savoir ce qu'ils cherchent – dans la plage des énergies que leur ouvrira le FCC:

*"After answering the question "where is the Higgs?" with the LHC, particle physics is now faced with an even more challenging question: "what is next and where is it?".* [21]

Ils comptent en partie sur la découverte de *"unknown unknowns"*. En gros: La théorie ne propose rien, allons-y quand même!

*"...when theoretical guidance is called into question, experimental answers must be pursued as vigorously as possible."* [2]

Ils se préparent également à une absence de résultats. Ce qui ne serait pas entièrement stérile puisque cela permettrait d'infirmer les théories qui en prédisaient... Le CERN évoque à ce sujet les expériences de Michelson et Morley (1880-1890) qui, ...

*"... designed to study the ether's properties, ended up disproving its existence and led to Einstein's theory of relativity."* [2]

- NB:
- Michelson et Morley ont engagé le budget d'un petit laboratoire, pas plusieurs dizaines de milliards.
  - Leurs expériences n'ont pas "conduit" Einstein à la relativité; ce raccourci didactique est sans valeur historique.
  - Dans le cas du télescope spatial James Webb, autre projet coûteux et risqué, on n'a jamais douté qu'il y aurait une foule de choses à observer dans la plage des fréquences accessibles.

### **Qu'en pensent les collaborateurs du CERN? Éléments de réponse:**

Il est difficile de le savoir. La communication officielle du CERN est constante dans son enthousiasme et ne mentionne aucun débat.

On peut supposer que les sceptiques ne prennent pas le risque de s'exprimer publiquement. Pourquoi mettre son emploi et sa carrière en jeu, pourquoi créer des tensions entre collègues?

### **Qu'en pensent les physiciens ne dépendant pas du CERN? Éléments de réponse:**

L'unanimité ne règne pas parmi les professionnels. Principales objections: la théorie ne prévoit rien d'intéressant à ce niveau d'énergie; l'argent est essentiellement dépensé pour du génie civil et des équipements; le CERN est pris par la folie des grandeurs.

La physicienne Sabine Hossenfelder s'est exprimée courageusement sur la question. Dans les deux articles et la vidéo suivantes, elle critique en particulier les promesses sensationnelles dont le CERN avait déjà abusé avec le LHC:

- *"The Uncertain Future of Particle Physics / Ten years in, the Large Hadron Collider has failed to deliver the exciting discoveries that scientists promised"* New York Times [30]
- *"The World Doesn't Need a New Gigantic Particle Collider"* Scientific American [31]
- *"Particle Physicists Continue Empty Promises"* youtube.com [32]

D'autres spécialistes partagent son avis:

- Adrian Cho: *"Ten years after the Higgs, physicists face the nightmare of finding nothing else"* Science [33]

D'autres pensent que le FCC n'est pas la meilleure option:

- Chandrashekhar Joshi: *"These gargantuan and costly machines are not the only options"* Scientific American [34]
- Tom Hartsfield: *"Please, don't build another Large Hadron Collider. A next-generation LHC++ could cost \$100 billion. Here's why such a machine could end up being a massive waste of money"* bigthink.com [35]
- Carlo Rubbia, ancien directeur du CERN, Prix Nobel de physique, juge la taille, le coût et le calendrier du FCC irréalistes et propose une autre approche. [36]

### **Qu'en pensent les organismes suisses de la recherche? Éléments de réponse:**

Ils semblent tous alignés derrière le projet.

- Le SEFRI, Secrétariat d'États à la formation, la recherche et l'innovation, en charge du dossier du CERN pour la Suisse.
- L'EPF de Zurich, par la voix de son recteur Günther Dissertori
- Le PSI, Paul Scherrer Institut, à Villigen, qui abrite le CHART
- L'EPF de Lausanne, Laboratoire de physique des accélérateurs de particules
- L'Université de Genève
- CHART, Swiss Accelerator Research and Technology, créé en 2016 pour le FCC; réunit le CERN, le PSI, l'EPFZ, l'EPFL et l'UNIGE

Là aussi, la communication officielle est constante dans son enthousiasme, ne mentionne aucun débat et passe le climat sous silence.

### **Qu'en pensons-nous?**

La question des résultats escomptés dépasse nos compétences. Il apparaît cependant qu'elle n'a pas été clarifiée à satisfaction alors que le projet est poursuivi avec vigueur. D'où le sentiment que le CERN pratique la stratégie du fait accompli.

### **8.3 Est-ce, pour la physique, la meilleure manière d'utiliser l'argent public ?**

Par son envergure, le projet risque de s'approprier toute la manne à disposition de la physique des particules, manne qui profitera de manière disproportionnée à la technique (génie civil, vide, froid, aimants...).

## **9. Applications pratiques des recherches prévues**

Aucune.

## **10. Retombées technologiques**

La construction et l'exploitation des accélérateurs du CERN a fait progresser plusieurs technologies. Les plus citées sont:

- La cryogénie: nécessaire à la supraconductivité (aimants supraconducteurs, radiofrequency cryomodules... )
- L'ultravide: les particules circulent dans des cavités au vide comparable à celui de l'espace interplanétaire; le vide sert également d'isolant thermique en cryogénie
- Les aimants supraconducteurs: l'actuel LHC en utilise plus de mille d'une quinzaine de mètres et pesant 35 tonnes
- L'informatique: énorme grille de calcul mondiale; Tim Berners-Lee a inventé le Web alors qu'il travaillait au CERN.

### **Remarques:**

- *"... tous ces bénéfices sont certes très importants [...] mais ils n'en restent pas moins secondaires pour justifier le financement de la physique des particules: l'argument scientifique doit être prééminent."*  
Christopher Llewellyn Smith, directeur du CERN de 1994 à 1998 [37]
- Tout projet technoscientifique disposant d'un budget comparable générerait des retombées technologiques du même ordre.

# 11. Rapport Utilité sociale/(Coût + Externalités négatives)

L'évaluation de l'utilité sociale d'un projet varie évidemment selon les milieux professionnels, les avantages personnels qu'on en attend, la publicité qui lui est faite, etc. L'évaluation de son coût et des nuisances qu'il occasionnera sur toute sa durée de vie est également délicate, ces chiffres étant destinés à évoluer selon les circonstances (telle infrastructure initialement utile peut se révéler ruineuse ou dangereuse avec le temps):

*"A fully-fledged Social Cost Benefit Analysis of one of the Future Circular Collider Conceptual Design Report's scenarios would require making assumptions on several key variables relating both with the costs and benefits generated by future research infrastructures over a very long time-span." [38]*

Le CERN estime que le bilan s'avérera positif. Tout d'abord parce qu'il y veille...

*"Strategic R&D for FCC-ee aims at minimising construction cost and energy consumption, while maximising the socio-economic impact. It will mitigate residual technology-related risks and ensure that industry can benefit from an acceptable economic utility." [2]*

.. puis parce que l'analyse du dernier grand programme de travaux de CERN (transformation du LHC en LHC-hl) l'aurait démontré:

*"The cost-benefit analysis of the LHC/HL-LHC programme reveals that a research infrastructure project of such a scale and investment volume has the potential to pay back in terms of socio-economic value creation throughout its lifetime." [2]*

L'analyse en question, *"Social Cost Benefit Analysis of HL-LHC"* [38], ainsi que la présentation qu'en donne le CERN [39] [40] soulignent tout ce qu'apportent les grands projets de ce genre au delà des découvertes scientifiques proprement dites, en termes de formation de la relève, de retombées techniques et industrielles, de culture du public, de publications et d'emploi.

**Là où le bât blesse**, c'est que les articles consacrés à ces questions ne tiennent pas compte des externalités négatives et feignent ignorer l'impact de ces projets sur le climat. Citons en particulier *"The Economics of Physics: The Social Cost-Benefit Analysis of Large Research Infrastructures"* [41]. On y trouve d'intéressantes équations où la notion d'externalité négative est bien introduite... puis oubliée en cours de route!. Nulle part, dans cette littérature n'apparaît le mot "climat". Cela ne peut être compris que comme un escamotage.

=> **Il n'existe pas d'analyse Utilité sociale/(Coût + Externalités négatives) sérieuse du FCC.**

Sur la blogosphère, certains collaborateurs du CERN règlent la question de manière plus carrée. Parlant du FCC:

*"The project IS inexpensive under all possible points of view. A serious cost-benefit analysis shows that projects like this create wealth, they DO NOT destroy it. That's a fact, not my opinion. You don't like facts? Your problem."*

A défaut d'analyse convaincante, posons les choses plus simplement: "Y a-t-il des intéressés"?

- |  |     |
|--|-----|
| • Formation d'ingénieurs et de scientifiques | Oui |
| • Industrie                                  | Oui |
| • Hautes écoles                              | Oui |
| • États et collectivités parties-prenantes   | Oui |
| • Carrières individuelles                    | Oui |
| • Écoles et tourisme scientifique            | Oui |
| • Reste de la société                        | Non |

A-t-on eu le courage d'intégrer au bilan la question de l'impact climatique du projet? Non

## 12. Scénario catastrophe

Le CERN consacre une page web "*The Safety of the LHC*" [42] aux phénomènes qui, selon certains, pourraient se produire dans ses accélérateurs et mettre en péril la région, voire la planète

Y sont mentionnés: • les bulles de vide • les monopoles magnétiques • les trous noirs • les strangelets.

Cela dépasse nos compétences.

## 13. L'entre-soi décisionnel

### Qui décide de lancer l'étude d'un projet de cette dimension?

- La Convention de 1953 à l'origine du CERN confie à la jeune organisation la construction de "un ou plusieurs accélérateurs" [43]
- Depuis lors, lorsque le CERN a terminé un nouvel accélérateur, il s'attaque au suivant.
- Le CERN ne travaille pas en vase clos, il collabore avec des dizaines d'universités et de laboratoires. C'est en échange avec les milieux de la physique des particules et des industries associées qu'il définit le profil de son prochain accélérateur.
- Tous les cinq ans, le Conseil du CERN nomme un **Groupe sur la stratégie européenne (ESG)** et le charge de lui soumettre une mise à jour de la **Stratégie européenne pour la physique des particules**.  
L'étude du FCC a été lancée pour répondre à la mise à jour de 2013. [44]
- L'ESG est assisté par le **Groupe préparatoire sur la physique (PPG)**, qui suscite et collecte les propositions scientifiques de toutes les parties prenantes de la stratégie (les centaines d'universités et de laboratoires).
- Un **Secrétariat stratégique** assiste les deux groupes, rédige la mise à jour de la stratégie et la soumet au Conseil. La mise à jour actuelle a été acceptée en 2020.
- Tout repose ensuite sur cette **Stratégie européenne** qui constitue "*the cornerstone of Europe's decision-making process for the long-term future of the field*" (la pierre angulaire du processus décisionnel à long terme de notre champ d'étude), ou, comme le précise le directeur du Projet du FCC Michael Benedikt, "*sert d'objectif et fournit la légitimation de nos efforts*". [45] [46] [47]

### Qui est le mandant dans cette affaire? Qui est le mandataire?

Eléments de réponse:

- Environ 90% de la soixantaine de personnes directement impliquées dans la structure décisionnelle décrite ci-dessus (**ESG, PPG, secrétariat stratégique**) sont physiciens ou physiciennes. Les autres sont des conseillers juridiques ou ont des responsabilités administratives.
- Ce sont ainsi des physiciens dépendant du CERN ou désignés par lui qui sont chargés de préparer un rapport sur les desiderata de la profession et de le transmettre au CERN.
- Fort de ce rapport, le Conseil du CERN déclare avoir reçu pour mission de satisfaire ces desiderata et se met au travail:  
"*In response to this recommendation, the Future Circular Collider (FCC) study was launched*" [2]

= > **D'où l'impression d'un parfait entre-soi décisionnel.**

Quant aux gouvernements des États membres, leur rôle semble avant tout celui de facilitateur:

*"While the delegates are briefed by their ministries to hold a certain line, the CERN Council has maintained the authority to negotiate and take decisions in the interest of the Organization, largely without permanent consultation with the governments."*  
[48]

En 1984, peu avant le début des travaux de l'actuel tunnel de 27 km, les *Editions d'en bas* publiaient un ouvrage collectif intitulé *"La Quadrature du CERN"*. Le long extrait suivant – qui confirme la citation précédente – n'a rien perdu de sa pertinence:

*"L'Organisation est dirigée par un Conseil. Celui-ci se réunit quelques fois dans l'année. En principe, c'est lui qui "détermine la ligne de conduite de l'Organisation en matière scientifique, technique et administrative" et exerce le contrôle principal sur son fonctionnement. Ce conseil est constitué de représentants des gouvernements. Pour chaque pays, il y a deux représentants, un représentant du Ministère des affaires étrangères [...] et un représentant du Ministère de la recherche [...]. En ce qui concerne le représentant du Ministère des affaires étrangères, on constate que ce fonctionnaire est en général chargé de suivre plusieurs organisations internationales et de nombreuses conférences en divers lieux du globe, qu'il est par nature incompetent en physique des particules. Le fonctionnaire qui représente son gouvernement pour la recherche est en général un chercheur qui a été associé au CERN pour des recherches antérieures et qui a ainsi avec lui des liens qui vont l'inciter à promouvoir le CERN auprès de son gouvernement plutôt qu'à représenter les intérêts des citoyens de celui-ci et contrôler objectivement le CERN.*

*Il faut bien remarquer que les représentants des gouvernements sont des représentants désignés par l'exécutif et non pas des responsables politiques. Les gouvernements n'ont pas prévu de leur donner le temps et les moyens nécessaires pour assurer une véritable direction de l'organisation. Ils débattent à partir de documents préparés pour eux entre autres par l'administration du CERN et ils n'ont guère la possibilité de contrôler l'exactitude effective ou l'opportunité de ce qui est contenu dans ces rapports. Or le pouvoir du Conseil est énorme. Le point 4 de l'article II [de la Convention pour l'Établissement d'une Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire] lui permet en effet de définir "tout programme supplémentaire d'activités" par un vote aux deux tiers, même si ce programme n'a rien à voir avec la physique des particules.*

*Les parlementaires nationaux ayant voté le cadre institutionnel initial n'interviennent pratiquement plus dans la gestion du CERN d'autant plus que les questions touchant les organisations internationales apparaissent comme trop spécialisées et à réserver aux experts." [49]*

# 14. La communication du CERN sur le FCC

Les études de faisabilité (livrables fin 2025) sont structurées en volets. L'un porte sur **La Communication et le Travail public**:

*"Pour assurer un avenir brillant au CERN et à la physique des hautes énergies en Europe, il s'avère essentiel de faire comprendre aux gouvernements et au grand public, par une communication convaincante, efficace et simple, l'importance de la mission scientifique du CERN, de la recherche motivée par la curiosité et du développement de la connaissance considérée comme une fin en soi, ainsi que des perspectives qu'ouvrirait dans ce contexte un collisionneur post-LHC." [50]*

A cette fin, le CERN a adopté une **stratégie de communication** présentée dans un document de 37 pages trouvé naguère sur le web mais n'y figurant plus [51]. Le public ciblé est large:

*"The global high-energy experimental particle physics community.  
The global theoretical physics community.  
Other science communities in fields related to the study and beyond.  
French and Swiss authorities and notified bodies.  
French and Swiss local communities.  
Science & technology decision makers, funding agencies and opinion leaders.  
Media representatives.  
Citizens in CERN Member States and Associate Member States.  
Citizens and voters in selected CERN Non-Member States (list to be defined).  
Educators and educational/academic institutions.  
Students in higher education.  
Industry executives and collaborator."*

Dans ces groupes, il s'agit de distinguer entre supporters, sceptiques et critiques/opposants. Les **sceptiques** seront approchés comme des personnes mal informées ("*with an FCC related information deficit*"). Quant aux **critiques/opposants**, on évitera de traiter proactivement avec eux, par souci d'efficacité et pour maintenir un ton positif. Des tactiques de communication bien rôdées.

Parmi les objectifs visés, signalons:

*"Positioning FCC among the multitude of perceived urgent priorities in the world today. (Covid, climate change, economic inequality, access to drinking water, health care, migration ...)"*

Quelle candeur d'ajouter le FCC à la liste des calamités qui nous oppressent! Remarquons que dans ces 37 pages, **c'est l'unique passage où le mot "climat" apparaît**. Le terme "*sustainable*", lui, est généreusement employé dans les "*key messages*" (formules à diffuser), sans que l'on saisisse sa pertinence dans ce contexte:

*"Sustainable peace comes through collaboration"*

*"SCIENCE FOR A NEW ERA: Global, Collaborative, Sustainable"*

*"The FCC collaboration is committed to the goals of sustainable development and strives to present a truly 'green' research infrastructure"*

*"FCC is collaborative, open and sustainable"*

## Un exemple de communication créative: les matériaux d'excavation

Gros casse-tête pour le projet de FCC: l'évacuation des 9 millions de m<sup>3</sup> de molasse issus forage du tunnel et de ses annexes (voir 2.3).

Du point de vue environnemental et des nuisances imposées à la région, **c'est une bombe**. Le CERN a donc ouvert le concours international d'idées "*Mining the Future*" en collaboration avec une haute école autrichienne, la Montanuniversität...

*"... with a clear challenge: identify credible solutions for the innovative reuse and sustainable management of the large quantities of molasse material expected during the construction phase of the new future research infrastructure FCC." [52]*

Le défi est de taille. Et, tant qu'à être ambitieux, allons-y:

*"The Mining for the Future competition [...] wants to support technologies to integrate this material into the future circular economy." [53]*

Voilà les montagnes de molasse associées à une souhaitable mais évasive économie circulaire alors que les résultats du concours n'étaient pas encore connus. Un coup de pouce supplémentaire et la molasse va nous aider à atteindre nos objectifs climatiques:

*"By keeping excavated materials in play, circular economy models offer a clear pathway toward achieving our collective climate goals, and reducing the greenhouse gas emissions tied to the extraction, processing, manufacturing and landfilling of natural resources." [54]*

Ainsi désamorcée et réhabilitée, la bombe environnementale peut être intégrée aux *"suggested narratives"* et à la *"story factory"* qu'on développe autour du projet. La Stratégie suggère en effet d'étayer par la mise en avant d'initiatives telles que Mining the Future l'interprétation selon laquelle le FCC priorise la durabilité:

*"Fostering understanding that FCC prioritises sustainability through featuring initiatives like 'Mining the Future.'" [51]*

**Finalement:** Le projet primé fin septembre 2022, *"Molasse is the new ore"*, propose une méthode d'identification en temps réel des matériaux excavés, ce qui en facilitera le traitement. La question de leur extraordinaire volume, elle, n'est pas résolue.

## 15. Réveil de la "communauté de la physique des particules" ?

Dans un récent article déjà cité plus haut, "*Climate impacts of particle physics*" [16], huit chercheurs en physique des particules abordent la question de l'impact général de leur discipline sur le climat:

*"Current and future activities in particle physics need to be considered in this context [la crise climatique], either on the moral ground that we have a responsibility to leave a habitable planet to future generations, or on the more practical ground that, because of their scale, particle physics projects and activities will be under scrutiny for their impact on the climate."*

Ils remarquent que l'empreinte carbone des chercheurs de leur discipline est très supérieure à celle du citoyen lambda alors qu'il est impossible de préciser en quoi la société profitera de leurs travaux. Ils s'inquiètent particulièrement des quatre domaines suivants:

- La construction des très grandes installations expérimentales
- La conception et l'exploitation des détecteurs, lesquels utilisent des gaz à effet de serre très virulents
- L'énorme puissance de calcul nécessaire à l'exploitation des résultats
- Le mode de travail des chercheurs incluant de nombreux vols intercontinentaux.

Ils recommandent d'être transparents sur les chiffres, de faire des efforts dans tous les secteurs et de bien communiquer ces efforts.

**Jamais pourtant n'est évoquée la possibilité de renoncer à de nouveaux mégaprojets eu égard à la crise climatique!**

Ce discours est dominant dans ce milieu: on y reconnaît l'existence du problème mais on évite de mentionner la décision qui s'impose: ne pas aggraver la situation, **ne pas construire l'accélérateur de réchauffement que serait le FCC.**

**Même attitude** dans le document de référence qui demande au CERN de faire du FCC l'une de ses initiatives prioritaires:

*« [L]'impact environnemental des activités de physique des particules devra continuer d'être étudié de près, et d'être limité autant que possible. Un plan détaillé visant à limiter le plus possible l'impact environnemental et à économiser et réutiliser l'énergie devra faire partie du processus d'approbation de tout projet important ». [56] [19]*

Ici, "*autant que possible*" et "*le plus possible*" laissent le champ libre au forage d'un tunnel de 100 km, à l'emploi massif de fluides frigorigènes fluorés et au triplement de sa consommation d'électricité, toutes choses dont le l'impact sur le climat est patent.

**Même attitude** dans une présentation du Laboratoire de physique des accélérateurs de particules de l'EPFL [57]. Elle débute par l'inévitable constat:

*"Climate change causes critical reflections on non-sustainable energy carriers and irresponsible consumption of energy and resources. With our research we must contribute to solutions and should not be part of the problem."*

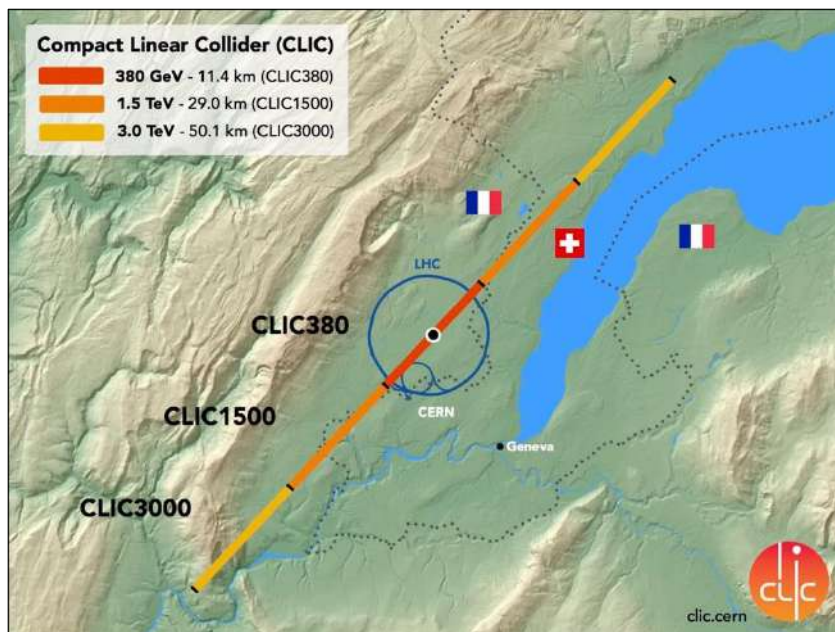
Puis passe aux différentes manières d'optimiser le rendement des accélérateurs sans remettre en cause les mégaprojets actuels, pour conclure par un message optimiste qui – aucun exemple ne venant l'étayer – relève du mantra ou du tour de passe-passe,:

*"Our community can contribute to the solution of the global energy problem through spin-offs of our R&D and through international networking" [57]*

## 16. Est-il prématuré d'intervenir?

Le CERN affirme ne pas encore avoir choisi entre les différents projets de collisionneurs post-LHC à l'étude. Au vu de l'écart entre les moyens engagés pour le FCC et les autres projets à l'étude, au vu du nombre de publications, du nombre d'accords de collaboration, de conférences, de séminaires, de pages web, etc., difficile de ne pas voir que le FCC est le grand favori.

Quant au CLIC, que le CERN pourrait proposer en cas d'échec du FCC, il pêche également par son inopportunité et son gigantisme.



Une autre raison d'attendre serait que le Conseil du CERN ne prendra la décision de construire ou non le FCC qu'en 2027 - 2028. Donc rien ne presse, on a tout le temps d'en discuter. Sauf que...

- On n'en discute pas vraiment.
- Le CERN travaille au projet depuis une quinzaine d'années, y a associé plus de 170 laboratoires et, le jour de la décision, y aura investi largement plus que les 100 millions consacrés aux actuelles études de faisabilité.
- Parallèlement aux études proprement dites, le CERN et les milieux intéressés auront bétonné leur travail de relations publiques dont l'objectif est que, à l'heure du choix, la décision de construire semble aller de soi, ou que celle d'y renoncer paraisse impensable.

Ainsi, plus on tardera à réévaluer le projet à la lumière de son impact climatique, plus il sera difficile d'y renoncer.

C'est **aujourd'hui** qu'il faut examiner froidement la question. Les tenants du projets préféreraient cependant ne pas hâter les choses:

*"Un défi particulier sera d'éviter l'emballement médiatique, en particulier dans la région genevoise, avec des raccourcis ou des simplifications laissant à penser que les États membres auraient pris la décision de financer et de construire le FCC (ou tout autre projet alternatif, l'accélérateur linéaire CLIC par exemple)." [58]*

## 17. Le point de vue de noé 21

- A Genève, on sait depuis des années que **le CERN est vorace en énergie**. Sa consommation annuelle d'électricité s'élève à 1250 GWh, soit près de la moitié de celle du canton, 2700 GWh tous secteurs confondus (CERN non compris).

Comme le courant vient de France, ce chiffre n'entre pas dans le débat genevois sur l'énergie. Et comme le CERN est une organisation internationale au bénéfice des immunités et privilèges habituels, le canton n'intervient pas dans ses affaires. Ajoutons que le CERN fait la fierté des habitants de la région et, au niveau international, apparaît comme une institution d'exception.

Ainsi, bien que l'on sache depuis des années que le CERN est vorace en énergie, **on préfère n'en point parler**.

- Arrive la prise de conscience du **dérèglement climatique**, avec ses épisodes météo hallucinants et la suffocation programmée de millions de personnes.

Que faire? L'une des mesures qui s'imposent est d'**économiser l'énergie pour parvenir le plus rapidement possible à fermer les centrales thermiques**. La chose se révèle difficile. Une part de la population s'y efforce et adapte ses habitudes; une autre modifie quelques gestes quotidiens; une autre encore s'en moque éperdument.

- C'est **dans ce contexte** que le CERN annonce son intention de construire un accélérateur long de 100 km, **triplant à terme sa consommation d'électricité qui passera à 4 TWh par année**. Stupéfaction! Pour comparaison:

Les transports publics électriques suisses (chemins de fer, trams, trolleybus, etc.) consomment **3 TWh de courant de traction par année**. Ils transportent plusieurs millions de personnes et 200'000 tonnes de marchandises par jour.

Pour accélérer, entrechoquer et étudier les particules, le CERN et son FCC consommeraient un tiers de plus d'électricité qu'eux.

- Se pose alors la question de l'à-propos d'un tel projet dans le contexte du dérèglement climatique.

Soucieux de bien saisir les tenants et les aboutissants du projet, nous l'avons étudié sous divers angles et constaté que **les points suivants suffisaient à le disqualifier**:

1. Sa pharaonique consommation électrique

Au nom de quoi le CERN s'approprierait-il une telle part d'une électricité dont il s'agit d'économiser chaque kWh ?

2. Son impact climatique

Au nom de quoi le CERN s'estime-t-il dispensé de tenir compte de la question climatique ?

3. L'impact du chantier sur la région

Sept ans de travaux, une soixantaine de km de routes à construire, une centaines d'hectares pour les sites de surface, quatre pyramides de Chéops de débris à évacuer, les norias de poids lourds.

**Notre conclusion est que le FCC est indéfendable:**

- **il est incompatible avec notre politique climatique,**
- **il tourne au ridicule tous nos efforts d'économies d'énergie et décourage les gens de bonne volonté.**

**Nous souhaitons que le CERN renonce de lui-même à ce "projet de trop" ainsi qu'à tout autre projet similaire.**

**S'il ne le fait pas spontanément, nous souhaitons que la Suisse prenne ses responsabilités et...**

- **... fasse rapidement savoir que ses représentants au Conseil du CERN voteront contre la réalisation du FCC;**
- **... prenne contact avec les autres États membres pour les encourager à faire de même;**
- **... engage avec eux des discussions visant à plafonner la consommation d'énergie du CERN.**

# Références

Le CERN fait preuve d'une grande transparence sur quantité de sujets. La majeure partie des informations utilisées dans ce document provient de ses sites web. Nous vous en recommandons la lecture.

- [1] <https://cerncourier.com/a/host-states-gear-up-to-work-on-fcc/>
- [2] *"Future Circular Collider Conceptual Design Report Vol. 2: FCC-ee: The Lepton Collider"*, Eur. Phys. J. Special Topics 228, 261–623 (2019)
- [3] *"Tunnelling Studies for CERN's Future Circular Collider"*, John Andrew Osborne, Joanna Louise Stanyard, Leonardo Ariza, Werner Dallapiazza
- [4] <https://fcc.web.cern.ch/overview>
- [5] *"FCC Feasibility Study"*, Fabiola Gianotti (CERN) ECFA, 23/7/2021
- [6] <https://indico.cern.ch/event/1055562/contributions/4460980/attachments/2286764/3886757/ECFA-FCC-2021.pdf>
- [7] <https://www.ge.ch/document/point-presse-du-conseil-etat-du-19-mai-2021>
- [8] Rapport explicatif PRODES, OFROU, 26 janvier 2022
- [9] *"Guide pour la réutilisation des matériaux d'excavation non pollués"*, République et Canton de Genève, DGE, Genève
- [10] <https://miningthefuture.web.cern.ch/files/FCCIS-MiningTheFutureParticipationGuidelines.pdf>
- [11] Réponse du Conseil d'État Genevois à la question Q 3848-A: *"Quelle gouvernance pour le nouvel anneau de collision du CERN ?"*
- [12] *"Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur"*, Julia Sauer, thèse de doctorat, Technische Universität München, 2016
- [13] *"Carbon foot print evaluation in tunneling construction using conventional methods"*, R. Rodriguez et F. Perez, 2001, Tunnelling and Underground Space Technology
- [14] *"Estimation des émissions de GES par le FCC"*, Félix Dalang, <https://www.noe21.org/documentation>
- [15] *"The carbon footprint of proposed e+e-Higgs factories"*, Patrick Janot et Alain Blondel, <https://arxiv.org/abs/2208.10466> [hep-ph]
- [16] *"Climate impacts of particle physics"*, Kenneth Bloom, Veronique Boisvert, Daniel Britzger, Micah Buuck, Astrid Eichhorn, Michael Headley, Kristin Lohwasser, and Petra Merkel, Proceedings of the US Community Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2021), arXiv:2203.12389v2 [physics.soc-ph]
- [17] *"Informationsblatt CO2-Faktoren"*, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (D), 2021
- [18] <https://home.cern/fr/science/grands-froids-et-performances-les-systemes-cryogeniques-du-cern>
- [19] *"Rapport sur l'Environnement 2019-2020"*, CERN
- [20] *"Proposition de règlement de la Commission européenne sur les gaz à effet de serre fluorés"*, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/496753/IPOL-JOIN\\_NT\(2013\)496753\\_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/496753/IPOL-JOIN_NT(2013)496753_FR.pdf)
- [21] *"Future Circular Collider Conceptual Design Report Vol. 3: FCC-hh: The Hadron Collider"*, Eur. Phys. J. Special Topics 228, 755–1107 (2019)
- [22] Vidéo du 50<sup>ème</sup> anniversaire du LHC, octobre 2021: <https://home.cern/news/news/cern/relive-50th-anniversary-hadron-colliders-cern>, 15:22
- [23] *"Energy efficiency – a new frontier"*, Courrier du CERN, 16 May 2019
- [24] *"Particle physicists hash out long-term strategy for Europe"*, Physics Today **73**, 9, 26 (2020)
- [25] <https://home.cern/fr/science/computing/grid>
- [26] <https://www.greenit.fr/2009/04/24/combien-de-co2-degage-un-1-kwh-electrique>
- [27] *"Decarbonization strategies for Switzerland considering embedded greenhouse gas emissions in electricity imports"*, Martin Rüdüsüli, Ellior Roman, Sven Eggimann, Martin K.Patel, Energy Policy, March 2022
- [28] <https://home.cern/fr/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>
- [29] <https://home.cern/fr/science/accelerators/future-circular-collider>

- [30] *"The Uncertain Future of Particle Physics / Ten years in, the Large Hadron Collider has failed to deliver the exciting discoveries that scientists promised"*, Sabine Hossenfelder, New York Times, 23 janvier 2019
- [31] *"The World Doesn't Need a New Gigantic Particle Collider"*, Sabine Hossenfelder, Scientific American, juin 2020
- [32] *"Particle Physicists Continue Empty Promises"*, Sabine Hossenfelder, <https://www.youtube.com/watch?v=9qqEU1Q-gYE>
- [33] *"Ten years after the Higgs, physicists face the nightmare of finding nothing else"*, Adrian Cho, Science, 13 juin 2022
- [34] *"New Ways to Smash Particles"*, Chandrashekbar Joshi, Scientific American, juillet 2021
- [35] *"Please, don't build another Large Hadron Collider. A next-generation LHC++ could cost \$100 billion. Here's why such a machine could end up being a massive waste of money"*, Tom Hartsfield, <https://bigthink.com/hard-science/large-hadron-collider-economics/>
- [36] *"Proposals for Higgs beyond LHC"*, Carlo Rubia, <https://home.cern/news/news/cern/relive-50th-anniversary-hadron-colliders-cern>, slide #25
- [37] *"Le public et la physique des particules"*, Christopher Llewellyn Smith, CERN Courier octobre 1998
- [38] *"Initial guidelines for social cost-benefit analysis of the FCC programme"*, Bastianin, Andrea et al., 13 March 2019, <http://cds.cern.ch/record/2666742>
- [39] <https://cerncourier.com/a/lhc-upgrade-brings-benefits-beyond-physics>
- [40] <https://fcc.web.cern.ch/society>
- [41] *"The Economics of Physics: The Social Cost-Benefit Analysis of Large Research Infrastructures"*, Massimo Florio et Chiara Pancotti, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190871994.013.23>
- [42] <https://home.web.cern.ch/science/accelerators/large-hadron-collider/safety-lhc>
- [43] *"Convention pour l'Établissement d'une Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire"*, Paris, le 1<sup>er</sup> juillet 1953
- [44] <https://council.web.cern.ch/fr/content/composition-et-mandat>
- [45] <https://cds.cern.ch/record/2721370/files/CERN-ESU-015-2020%20Update%20European%20Strategy.pdf>
- [46] <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/swisstopo/manifestations.detail.event.html/swisstopo-internet/events2022/colloquium-21-22/20220128.html>
- [47] <https://europeanstrategy.cern/european-strategy-for-particle-physics>
- [48] *"Managing the Laboratory and Large Projects"*, Philippe Lebrun et Thomas Taylor, chap 11. de *"Technology meets research : 60 years of CERN technology : selected highlights"*
- [49] *"La Quadrature du CERN"*, Jacques Grinewald, André Gsponer, Lucile Hanouz, Pierre Lehmann, Editions d'en bas, Lausanne, 1984
- [50] *"Objectifs principaux du CERN pour la période 2021-2025"*, <https://home.cern/sites/default/files/2022-01/Objectifs%20principaux%20du%20CERN.pdf>
- [51] *"FCC Communications Strategy"*, Deliverable Report, <https://zenodo.org/record/5747574#.YrHrHC0yKfU> Lien rompu
- [52] <https://acceleratingnews.eu/index.php/news/issue-38/future-circular-collider-fcc/innovation-management-excavated-materials-fcc>
- [53] <http://miningthefuture.web.cern.ch>
- [54] <https://acceleratingnews.eu/index.php/news/issue-38/future-circular-collider-fcc/innovation-management-excavated-materials-fcc>
- [55] *"Climate impacts of particle physics"* (mars 2022) : arXiv:2203.12389v1
- [56] *"Mise à jour 2020 de la Stratégie européenne pour la physique des particules"*, <https://cds.cern.ch/record/2721370>
- [57] *"Energy Efficiency of Accelerator driven Research Infrastructures"*, Mike Seidel, Workshop Sustainable HEP :: 28-30 June 2021, CERN
- [58] *"Éléments de langage"*, brouillon à compléter, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Sandbox/GhislainROYsandboxfrench>

Il est possible que des erreurs se soient glissées dans nos réflexions. Soyez aimable de nous les signaler ([info@noe21.org](mailto:info@noe21.org)).