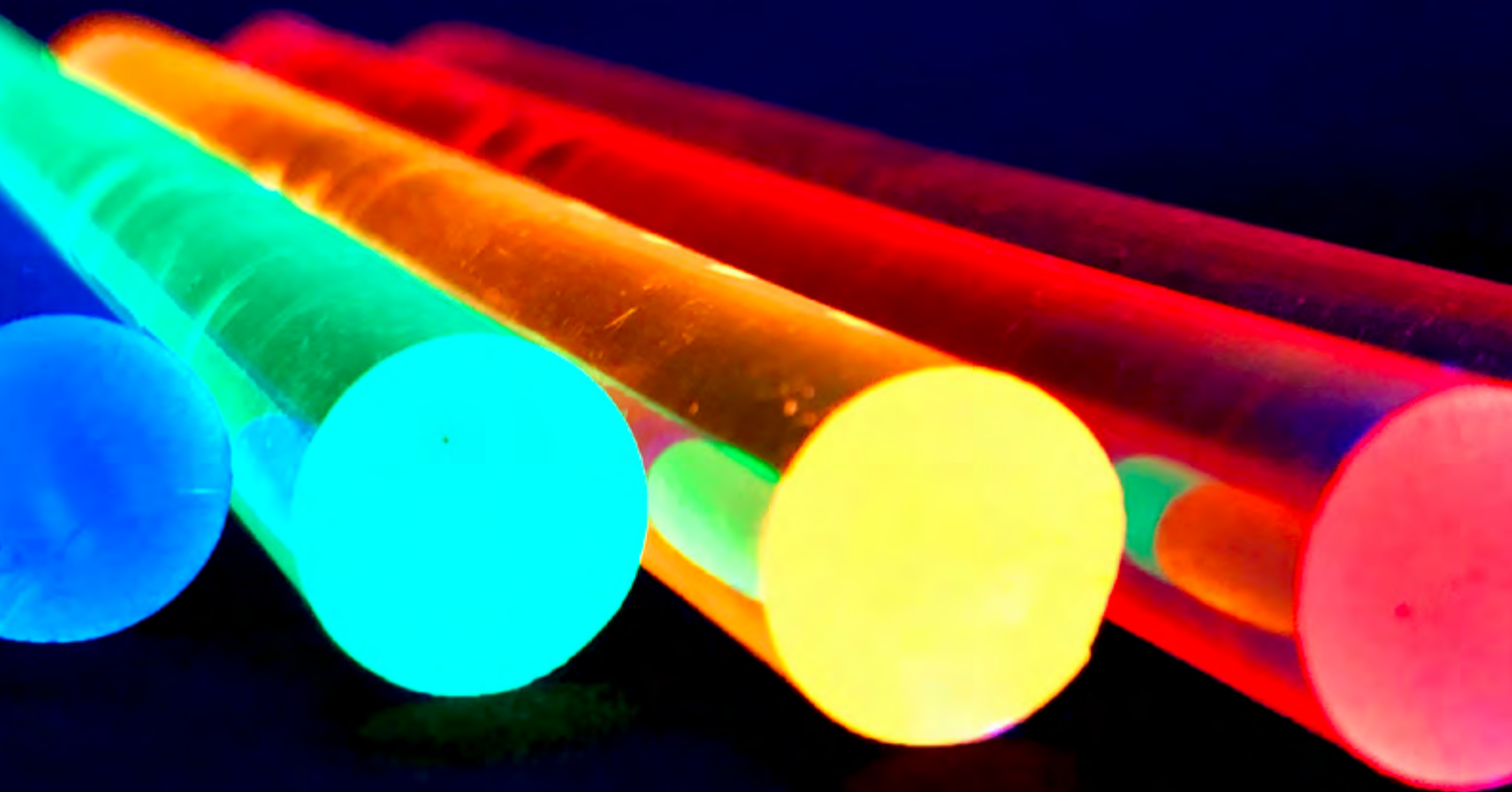


Prospectives de CNRS Physique

La physique à l'horizon 2030 :

recherche fondamentale et impacts sociétaux

2024



Prospectives de CNRS Physique

LA PHYSIQUE À L'HORIZON 2030 : RECHERCHE FONDAMENTALE
ET IMPACTS SOCIÉTAUX - 2024

Sous la direction de Thierry Dauxois et Frédéric Restagno

Coordination éditoriale

Frédéric Restagno et Pôle communication
de CNRS Physique

Conception / Maquette

Page B

Février 2024

Impression

CNRS IFSEM, secteur de l'imprimé



Sommaire

AVANT-PROPOS	6
ÉLECTRONIQUE ET PHOTONIQUE AVANCÉES	8
PHYSIQUE EN RÉGIMES EXTRÊMES	22
PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES	36
PHYSIQUE DE LA MATIÈRE COMPLEXE	50
MATIÈRE, LUMIÈRE ET PROCESSUS QUANTIQUES	64
PHYSIQUE DU VIVANT	78
LOIS FONDAMENTALES	90
NOUVEAUX ENJEUX POUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES	108
PHYSIQUE POUR LA SANTÉ	118
PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT	130
PHYSIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, L'URBAIN ET L'ALIMENTATION	144
PHYSIQUE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ET LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES	156
CULTURE SCIENTIFIQUE	166
PARITÉ ET DIVERSITÉ(S)	169
INTÉGRER LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À LA RECHERCHE EN PHYSIQUE	172
REMERCIEMENTS	184

Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en Physique

RÉSUMÉ

Ce document prospectif évalue **les conséquences de la crise environnementale sur la recherche en physique au cours des dix prochaines années, ainsi que les mesures nécessaires pour intégrer ces nouvelles contraintes tout en maintenant une recherche de haut niveau.** Il contient de nombreuses remarques qui s'appliquent à toutes les recherches, et tout particulièrement à la physique. Ainsi, la recherche en physique sera confrontée durant la prochaine décennie à l'obligation légale de réduire rapidement ses émissions de carbone (2 à 5 % par an) et devra faire face à des pénuries de ressources essentielles. **Sans une action déterminée de la communauté scientifique, cette crise environnementale pourrait avoir des conséquences néfastes sur la liberté de la recherche, la cohésion interne des laboratoires et le soutien public à la recherche en physique.** Répondre à ces enjeux entraînera des changements dans les pratiques de recherche aux échelles individuelle, du laboratoire, mais aussi institutionnelle.

Depuis plusieurs années, la communauté scientifique s'est engagée dans l'évaluation des impacts environnementaux de ses activités, notamment à travers l'initiative Labos 1point5. De nombreuses actions ont été entreprises pour réduire la consommation d'énergie, limiter les déplacements, réduire la production de déchets et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant, des divergences d'opinions ont émergé quant à la nécessité ou à l'efficacité de ces mesures, entraînant parfois des tensions. Les laboratoires ne pouvant être seuls tenus responsables de la réduction de leur empreinte carbone, **il serait bienvenu que les tutelles fournissent un cadre commun et des outils permettant à toutes les structures de recherche d'évaluer leur empreinte environnementale, et de proposer des trajectoires de réduction spécifiques pour chaque structure.** La réalisation de ces objectifs nécessitera des financements adaptés pour mettre en œuvre les transformations

nécessaires. Le numérique et les grandes infrastructures de recherche, tous deux fortement concernés par la raréfaction des ressources, devraient faire l'objet de concertations spécifiques en vue de leur mise en service aussi bien que de leur utilisation optimale.

La politique des ressources humaines jouera un rôle clé pour une utilisation optimale des ressources et le maintien d'une recherche de haut niveau. Une **politique volontariste de recrutement de personnel technique permettra aux laboratoires de transformer leurs pratiques** en faveur de la réparation, la fabrication économe, la maintenance et l'utilisation optimale des équipements et des infrastructures. Il sera également nécessaire d'**accompagner au mieux les chercheurs désireux d'adapter leurs pratiques ou leurs sujets de recherche aux enjeux environnementaux**, et à repenser les modalités d'évaluation pour valoriser les actions en faveur de pratiques durables.

Considérant que le modèle actuel de financement compétitif par appels d'offres, introduit dans un contexte de ressources abondantes, est mal adapté à la situation présente, il est également proposé d'accroître la **planification dans l'attribution des ressources et la coordination dans leur allocation**, et de viser à une meilleure **complémentarité entre les différents niveaux de financement** (régional, national, européen). L'importance d'un dialogue renforcé entre la communauté scientifique et la société est également soulignée, afin d'éclairer le public sur la réalité des impacts socio-environnementaux des recherches en physique et de leurs éventuelles retombées technologiques et pour **maintenir un soutien du public à l'effort public de recherche**.

Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en Physique

INTRODUCTION

Interroger l'avenir de la physique au CNRS, c'est chercher à entrevoir les domaines en émergence, mais aussi penser les conditions futures d'exercice de cette recherche. Jusqu'à récemment, elles pouvaient se résumer au budget dont disposait l'établissement et ses partenaires et au contexte institutionnel définissant statuts des personnels, place des agences de financement, grands programmes, politique européenne de la recherche, etc. À ces conditions s'ajoutent désormais les contraintes bien plus tangibles et incontournables des crises climatiques, énergétiques et écologiques. Ces crises, prédites de longue date par les scientifiques, se matérialisent et se répercutent dans toutes les sphères de la société et elle ne devrait que s'accroître dans la prochaine décennie. La physique étant gourmande en ressources naturelles, en objets technologiques et en énergie, elle en sera particulièrement affectée. Les contraintes qui toucheront notre activité sont de plusieurs natures :

— la recherche en physique devra prendre sa part de l'effort général de réduction des émissions carbone pour permettre au pays de respecter ses engagements internationaux. Si l'objectif pour notre discipline reste à préciser, les auditions laissent entrevoir un rythme minimum de réduction de 2% par an, plus probablement autour de 5%¹ ;

— L'énergie, qu'elle soit d'origine fossile, nucléaire ou renouvelable, va progressivement se raréfier.² Ainsi, même si l'électricité est faiblement carbonée en France, les efforts de sobriété et d'électrification des usages accroîtront les tensions d'approvisionnement auxquelles les laboratoires et plus encore les infrastructures de recherche n'échapperont pas ;

— D'autres ressources comme l'eau, l'hélium ou les terres rares, déjà sous tension, risquent également de ne plus être aisément disponibles ;

— Enfin, le changement climatique engendra des événements extrêmes (canicules, sécheresses, inondations, etc.) qui pourraient menacer certaines infrastructures de recherche.

Au-delà de ces conséquences directes, l'aggravation de la crise climatique et environnementale pourrait aussi fortement impacter la dynamique interne de la recherche.

D'une part, la recherche en physique devra faire face à une nouvelle demande sociétale qui exigera d'elle des solutions technologiques à cette crise. Elle a su, au fil des décennies, négocier un équilibre entre sa contribution à l'innovation et le maintien d'une recherche fondamentale de haut niveau. Mais la crise environnementale pourrait rapidement constituer une urgence quasi existentielle pour la population ou les décideurs. Dès lors, l'équilibre entre recherches appliquée et fondamentale pourrait être remis en cause et rendre plus incertain le soutien public à une recherche détachée de ces questions. Sans un nouveau compromis collectivement négocié, un nouveau « régime des promesses » pourrait se mettre en place, mettant en concurrence les sous-disciplines, chacune cherchant à justifier son existence par la perspective d'offrir un remède aux maux d'une société désemparée.

Un deuxième effet déstabilisant est déjà perceptible à bas bruit dans les laboratoires. Certaines personnes parmi les plus attentives aux enjeux environnementaux en viennent à s'interroger sur le sens de leur métier face à une menace pour la société perçue comme imminente. Si la discipline dans son ensemble refusait de prendre au sérieux ces interrogations et d'y répondre, une fracture pourrait apparaître au sein même des laboratoires, laissant de côté une partie des personnels. Ce mécanisme de démobilitation par perte de sens s'observe déjà chez certains étudiants, fortement sensibilisés à ces questions. Un tel processus de désaffection est peut-être la menace la plus sérieuse que fait peser la crise écologique sur la recherche en Physique.

Si, pour des raisons éthiques³ ou pragmatiques, la nécessité d'intégrer ces nouvelles contraintes dans nos pratiques a peu à peu gagné le monde de la recherche, c'est d'abord par des initiatives locales au sein des laboratoires, progressivement structurées avec notamment la création du collectif Labos 1point5⁴ dont le premier objectif était de promouvoir la réalisation de bilans de gaz à effet de serre (BGES). Au-delà d'un accompagnement bienveillant de ces initiatives, manifesté par exemple par la création du GDR Labos 1point5, les institutions de recherche seront amenées dans un avenir proche à contribuer à ces transformations de façon beaucoup plus significative et à la hauteur de ces nouveaux enjeux.

1 <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/plan-climat-biodiversite-et-transition-ecologique-de-l-enseignement-superieur-et-de-la-recherche-91292>

2 ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

3 comite-ethique.cnrs.fr/avis-du-comets-integrer-les-enjeux-environnementaux-a-la-conduite-de-la-recherche-une-responsabilite-ethique

4 labos1point5.org

Ce chapitre propose quelques pistes de réflexion, en se fondant sur un certain nombre de constats préalables :

— **Il faut tout d'abord lever l'illusion que la recherche en physique pourrait se soustraire à l'effort commun de sobriété et arguer d'une forme d'exception au nom de son rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique et ses effets.** La physique ayant accompagné et rendu possibles certains progrès techniques, elle pourrait être tenue pour responsable d'une partie des problèmes actuels de nos sociétés. Recherches fondamentales comme appliquées sont certes pertinentes dans cette lutte : elles peuvent apporter, à moyen et surtout long terme, des connaissances et des techniques facilitant l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets.⁵ Mais celles-ci seront insuffisantes au regard de l'ampleur et de l'urgence de la crise que le monde traverse⁶ et la physique doit donc, comme les autres secteurs, faire preuve d'exemplarité dans l'utilisation raisonnée des ressources et la réduction de ses propres émissions ;

— **Les institutions universitaires et de recherche réticentes à adopter une trajectoire de sobriété pourraient s'engager dans des démarches assimilables à du *greenwashing*.** D'ores et déjà apparaissent des classements « verts » des universités, prélude à leur mise en concurrence sur la base de prétendues vertus environnementales. Les institutions de recherche doivent refuser de participer à un tel mécanisme et faire preuve de transparence et de sincérité quant au véritable coût environnemental de leur activité et au réalisme des promesses technologiques qu'elles portent. Une telle démarche est impérative si l'on veut maintenir sur le long terme un soutien de la population et une attractivité de la discipline ;

— Le problème est en grande partie systémique : la recherche scientifique, notamment en physique, s'est construite dans un contexte d'abondance en ressources matérielles et en énergie. **Ce modèle doit être largement repensé pour intégrer dans nos pratiques la sobriété et l'efficacité dans l'utilisation des ressources que cette crise impose.** Ainsi, l'échelle du laboratoire, à laquelle se concentrent aujourd'hui l'essentiel des efforts, n'est que partiellement pertinente pour traiter ces questions.⁷ Il semble important que les organismes de recherche prennent le relais en proposant des outils et un cadre d'action cohérent et en s'engageant dans une refonte des modes de fonctionnement de la recherche : financement, évaluation, organisation des collectifs de travail, etc. ;

— Au-delà de ces réformes institutionnelles, **un changement profond s'impose dans une culture de la recherche** qui assimile trop souvent l'innovation au progrès, valorise la dépense matérielle et la mobilité aux dépens de

la réutilisation et la proximité, et qui lie dépense énergétique et excellence scientifique.

Partant de ce constat, le rapport est organisé suivant quatre axes de réflexion, traitant successivement de l'évolution nécessaire des pratiques de recherches à l'échelle du laboratoire, des adaptations en termes de politique de recherche en termes de financement, de ressources humaines et d'évolution des carrières, mais aussi des enjeux spécifiques des grandes infrastructures et du numérique.

ÉVOLUTION DES PRATIQUES AU SEIN DES LABORATOIRES

L'analyse des BGES⁸ offre un regard transverse sur les pratiques de la recherche à travers les ressources matérielles mobilisées. Elle montre que l'empreinte environnementale de la recherche en physique, science à dominante expérimentale, se rapproche davantage de celle du secteur industriel que du tertiaire. La dimension internationale de l'activité engendre également une forte mobilité. De nombreuses initiatives ont été prises dans les laboratoires pour tenter de diminuer ces impacts environnementaux, laissant apparaître de possibles divergences et points de tension.

SUR LES BGES ET PLANS DE RÉDUCTION

Depuis 5 ans environ, les BGES des laboratoires ont été conduits par des collectifs de volontaires, souvent soutenus par leur direction. Ils ont établi une méthodologie et organisé la délibération avec la volonté d'aboutir à un large consensus. De leur côté, les tutelles ont soutenu ces initiatives locales et agi pour une sensibilisation large à ces enjeux. Elles ont fait établir leur propre BGES afin de se conformer à une exigence légale.

Ce processus a mis au jour des divergences entre collègues. Certains soutiennent la prise en compte des enjeux environnementaux dans la pratique de la recherche, d'autres y sont opposés ou en désaccord sur le degré de prise en compte. Ces dissensions entre individus, équipes ou laboratoires sont d'autant plus sévères qu'elles s'ajoutent à la forte compétition dans l'attribution des moyens. Elles montrent que le volontarisme de quelques-uns ne peut suffire à emporter l'adhésion de tous : **sans un cadre cohérent, discuté et instauré à tous les niveaux, ces démarches individuelles se heurteront à une forme de scepticisme quant à leur efficacité.** Il est ici essentiel de rappeler que l'objectif premier des BGES est la mise en place d'un plan de réduction et non pas de comparer entre elles différentes structures dont le périmètre et les spécificités peuvent être très variables.

5 cnsr.fr/comitenational/cs/recommandations/Dereglement_climatique_et_CNRS_valide-4_07_2023.pdf

6 Sur les solutions technologiques pour la production d'énergie à l'horizon 2050 : www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques

7 sur les petits gestes et les efforts collectifs, voir : <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>, et lemonde.fr/podcasts/article/2022/07/05/climat-peut-on-sauver-la-planete-avec-des-petits-gestes_6133404_5463015.html

8 J. Mariette et al, *Environ. Res.: Infrastruct. Sustain.* 2 035008 (2022) ; André Estevez-Torres, communication privée.



Chantier et personnel de chantier. © Scott BLAKE, Unspalsh

CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES, BÂTIMENT ET RÉSILIENCE

Les personnels des laboratoires de physique possèdent une forte expertise spécifique dans l'analyse et l'optimisation des consommations des infrastructures et laboratoires. Celles-ci ont déjà été mises à profit dans plusieurs initiatives ayant permis de réduire la consommation énergétique d'instruments, bâtiments ou infrastructures sans dégradation du service, mais au prix d'un investissement important en moyens humains, depuis la conception jusqu'à la gestion des systèmes optimisés, voire aux modélisations réalisées par des chercheur·ses.⁹ Dans une perspective de réduction des impacts, il est donc essentiel de les impliquer en amont, mais également de valoriser leur implication. Au vu des montants en jeu, cependant, l'indispensable rénovation de bâtiments anciens est principalement du ressort des tutelles hébergeantes. Sur ce dernier point, insistons sur le fait qu'il existe une tension forte entre rénovation et nouvelles constructions avec artificialisation des sols. Il est nécessaire que les politiques de site intègrent davantage une évaluation environnementale des projets et des décisions.

Les laboratoires devront également se préparer aux événements extrêmes amenés à devenir plus intenses et plus nombreux et risquant d'impacter leurs activités : inondation, canicule, sécheresse, pénurie d'énergie. Certains ont déjà dû adapter temporairement leurs activités de recherche du fait de sécheresse ou de la hausse des prix de l'électricité. Il semble donc essentiel que, soutenus par les tutelles, ils se préparent dès aujourd'hui en mettant en place des plans de résilience dans l'esprit des plans de prévention des risques.

MOBILITÉ ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Concernant les missions, des systèmes de quotas d'émissions ont été mis en place, à l'échelle du laboratoire, de chaque équipe, ou de l'individu. Ces initiatives, qui ne sont qu'incitatives pour le moment, semblent relativement bien acceptées par les personnels. La décarbonation de la mobilité peut également passer par une généralisation du télétravail en prêtant attention au risque de perte de lien social et aux possibles effets rebond, comme l'étalement urbain ou l'inoccupation de locaux chauffés. Pour limiter les déplacements, les expériences effectuées à distance, notamment celles liées aux campagnes de mesure, dans les plateformes techniques ou les IR*, peuvent être également favorisées si cela ne nuit pas aux mesures elles-mêmes ou à la formation des jeunes scientifiques.

ACHATS

Les achats représentent l'un des principaux postes d'émission de la recherche,¹⁰ notamment en physique. Plusieurs initiatives de la part du CNRS visant à réduire leur impact méritent d'être mentionnées : allongement à 5 ans de garantie exigée sur le matériel informatique, présence de critères environnementaux dans les mises en concurrence, mise en place d'une bourse matériel¹¹ par le CNRS. D'autres progrès sont envisageables dans un avenir proche, comme le prolongement des garanties sur l'ensemble des marchés nationaux, la primauté donnée aux logiciels ouverts pour réduire l'obsolescence des équipements scientifiques, ou encore le développement d'approches issues de l'économie de la fonctionnalité (location par exemple) pour une partie des matériels.

Au sein des laboratoires, les initiatives qui portent sur ce poste d'émission semblent actuellement modestes, en partie en raison de la prise de conscience trop récente de l'importance des achats dans leur empreinte carbone. Plus probablement, elle reflète le fait que **les laboratoires ont peu de contrôle sur les achats effectués par leurs équipes**, notamment lorsque leurs ressources sont majoritairement contractuelles. Une réduction significative de ce poste d'émission, que permettrait par exemple une meilleure mutualisation des équipements, nécessitera donc des changements dans les modes de financement.

ÉVOLUTION DES POLITIQUES DE RECHERCHE

SUR LES MODES DE FINANCEMENT

Gains d'efficacité, miniaturisation, levée de verrous techniques ont nourri les progrès de la recherche et permettent souvent une économie de ressources pour un même usage.¹² Néanmoins, le pilotage de la recherche publique repose actuellement pour une large part sur un financement par appels d'offre compétitifs, associé à l'idée selon laquelle une forte concurrence entre acteurs garantissait une affectation optimale des ressources humaines. Si ce point de vue pouvait s'entendre dans un contexte d'abondance matérielle, un tel modèle apparaît inadapté à la situation à venir de ressources limitées et de nécessité de prise en compte des externalités négatives de la recherche. En effet, **une telle compétition ouverte, sans coordination, est par nature inefficace sinon contre-productive du point de vue de la sobriété :** elle conduit à ce que plusieurs équipements identiques puissent être achetés, que des simulations concurrentes sur des mêmes modèles soient effectuées, que des ex-

9 Cas du C2N: labos1point5.org/les-colloques/webinaire-reseau-2023, 2^e vidéo, à partir de 47'17"; et du LNCMI: indico.esrf.fr/event/2/contributions/110/

10 M. De Paeppe, et al., *Purchases dominate the carbon footprint of research laboratories*, bioRxiv 2023.04.04.535626

11 intranet.cnrs.fr/Cnrs_pratique/acheter/boursemateriel; et dons.encheres-domaine.gouv.fr/ (pour le mobilier)

12 Les mises à niveau des IR* vont dans ce sens. À l'inverse, la surutilisation qui peut en découler annule souvent les gains par effet rebond, comme l'illustre le domaine du numérique.

périences similaires soient menées, etc. L'individualisation des financements, à l'échelle du seul scientifique ou d'une équipe restreinte, produit également de fortes fluctuations au sein des moyens disponibles, qui sont un obstacle à une utilisation optimale et raisonnée de ressources devenues plus rares.

Valoriser l'économie de moyens pourrait s'accompagner d'une émancipation progressive du modèle actuel dans lequel la compétition aux résultats est sous-tendue par une compétition sur l'obtention de ressources matérielles et humaines. L'exemple de l'astrophysique, où certains collègues exploitent sur la durée d'anciennes données, illustre comment une telle démarche peut donner lieu à de nouveaux résultats.¹³

Une forme de planification des moyens de la recherche, associée à une coordination accrue des différents acteurs, permettraient de favoriser les dynamiques coopératives et de distribuer les ressources allouées de façon optimale et de tirer le meilleur parti de la vision globale du paysage scientifique dont disposent les organismes nationaux de recherche tels que le CNRS. La possibilité de report de crédits et une programmation budgétaire pluriannuelle des investissements faciliteraient considérablement cette démarche, ainsi que le déploiement des moyens au sein de structures fédératives favorisant la mise en commun du matériel et du personnel de soutien, mais aussi des sujets de recherche eux-mêmes (GDR).

La multiplication d'équipements semblables et la mise en concurrence sont facilitées par la coexistence de multiples échelons de financement, aux niveaux local, régional, national, européen et international, induisant redondance et complexité superflues. Un fort gain potentiel pourrait résider en une délimitation plus claire du périmètre propre de financement de chaque opérateur.

RENFORCER LE DIALOGUE AU SEIN DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE, ET AU-DELÀ

L'un des arguments en faveur de la multiplicité des guichets de financement est de libérer les chercheur·ses d'une dépendance excessive à l'égard de la direction du laboratoire et de leurs tutelles directes. Un risque possible inhérent au mode de financement proposé plus haut est donc le retour d'une forme de mandarinat doublé d'un dirigisme institutionnel accru sur la recherche. Aussi est-il impératif que cette évolution s'accompagne d'un renforcement de structures collectives (conseils de laboratoires, Comité National du CNRS, Conseil National des Universités) permettant de débattre collégialement et de manière transparente des orientations de la recherche.¹⁴

Ces espaces de délibération pourront s'assurer du maintien d'un équilibre entre recherches fondamentale et à visée applicative, dans un contexte où la demande

sociétale autour des enjeux environnementaux deviendra plus forte. Il s'agira en particulier de préserver un espace de liberté aux chercheur·ses, y compris sur des sujets sans lien direct avec les questions d'environnement et dont la part dans les sources de financement pourrait devenir excessivement réduite.

Dans un contexte de tensions sur les ressources et de crise environnementale, la recherche en physique devra par ailleurs faire preuve de transparence à l'égard du grand public. Il en va de sa capacité à maintenir un soutien de l'opinion aux efforts consentis en faveur de cette discipline, mais aussi de son attractivité vis-à-vis des jeunes générations. Ce dialogue renforcé avec la société permettra de démontrer une attention sincère aux enjeux de sobriété dans ses pratiques. Il permettra également de montrer que la physique peut apporter des réponses aux enjeux actuels qui ne sont pas seulement technologiques. Dans ce cadre, la Physique pourra être interpellée et amenée à effectuer une évaluation critique de ses grands domaines de recherche aux enjeux élevés et bénéficiant de financements spécifiques, y compris sur les sujets liés à l'énergie, dans le but d'éclairer la réalité des impacts socio-environnementaux de ces recherches et de leurs éventuelles retombées technologiques.

VERS DE NOUVEAUX OBJETS DE RECHERCHE

S'il est clair que certains objets d'étude imposent des choix techniques et organisationnels, les pratiques et le développement de nouveaux instruments guident en retour les choix de sujets. **Une société plus sobre imposera d'inventer une physique plus sobre dans ses pratiques, mais aussi renouvelée dans ses sujets.** Compte tenu du rythme élevé de réduction des émissions qui sera nécessaire, il semble en effet difficile d'imaginer que l'évolution de la physique ne puisse procéder que par adaptation progressive. **Il nous revient donc dès à présent d'imaginer ce que pourrait être une physique « frugale », ou physique « bas carbone ».** Dans cette perspective, la physique pourrait par exemple s'inspirer d'une partie de la chimie qui a vu se développer depuis les années 1990 une « chimie verte » fondée sur un certain nombre de principes visant à réduire et éliminer l'usage ou la production de substances néfastes pour l'environnement, et promouvant plus généralement l'économie de moyens.

Un levier pour encourager une telle évolution serait d'associer ces changements de pratiques à des projets de recherche intra ou inter-équipes ou inter-laboratoires, y compris hors du champ disciplinaire traditionnel de la physique, par exemple en relation avec les sciences humaines. Les réflexions et les solutions ainsi développées constituent en soi un progrès des connaissances et ont vocation à être partagées et diffusées au-delà du monde de la recherche.

¹³ www.nature.com/articles/d41586-023-00837-0

¹⁴ Cette nécessité rejoint les recommandations exprimées par le COMETS dans son récent rapport (voir note page 101).

RESSOURCES HUMAINES ET CARRIÈRES

La politique de ressources humaines jouera un rôle clé pour réduire l'impact environnemental des laboratoires tout en maintenant une recherche de haut niveau.

UNE POLITIQUE DE L'EMPLOI AU SERVICE D'UNE MEILLEURE UTILISATION DES MOYENS MATÉRIELS

Infrastructures et équipements pèsent lourd dans le bilan écologique de CNRS Physique. **Un gisement important d'économie en ressources est une meilleure gestion et utilisation du parc de matériel existant** au travers d'une maintenance plus suivie, des achats groupés (magasins sur site), des réparations en interne. **Cela nécessitera une redéfinition des missions des personnels de soutien doublée d'une politique ambitieuse de recrutements pérennes.** Il est en effet illusoire de penser que les personnes actuellement en poste pourront seules absorber la charge de travail supplémentaire qu'impliquent ces mesures. Le recours actuel aux bonnes volontés a atteint ses limites : de nombreux témoignages pointent l'épuisement de personnels surchargés par le travail supplémentaire que ces missions induisent, nuisant à l'accomplissement de leurs missions premières. L'accompagnement de ces évolutions devra faire l'objet d'une attention particulière par les établissements de recherche.

ACCOMPAGNER LES AGENTS DÉSIROUX D'ADAPTER LEUR PRATIQUE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

La qualité de la recherche au CNRS reflète pour l'essentiel le talent et l'enthousiasme de ses agents. Le spectre scientifique du CNRS, la liberté qu'il laisse à ses personnels sont des atouts d'attractivité uniques permettant de compenser des salaires relativement modestes. Mais au-delà de cette liberté, **la question du sens de leur mission est centrale pour les personnels.** La conviction de participer à une œuvre enrichissante et chargée de sens est remise en question par beaucoup au regard de l'urgence climatique. Ce questionnement peut prendre différentes formes, depuis le besoin d'agir à l'échelle du laboratoire, jusqu'au désir de redéfinir totalement ses activités au sein ou hors du CNRS.

Le niveau de remise en question le plus courant actuellement est le besoin d'aligner sa pratique professionnelle avec une démarche personnelle de réduction d'impact : les personnels concernés s'impliquent alors spontanément dans la transition des laboratoires, comme décrit plus haut, souvent de façon totalement désintéressée, mais pouvant aussi, légitimement, susciter l'espoir d'une certaine reconnaissance pour cet investissement.

Nombreux aussi sont celles et ceux qui questionnent le sens même de leur sujet d'étude et opèrent des ré-

orientations thématiques tout en restant proches de leurs domaines d'expertise. Ces réorientations sont relativement simples et il est donc difficile d'obtenir des données chiffrées sur leur ampleur. Elles peuvent être facilement valorisables lorsqu'elles restent dans le champ même de la discipline, mais peuvent être plus délicates (financement, évaluation) lorsqu'elles explorent des approches nouvelles qui sortent du cadre scientifique standard (*low techs* par exemple). Certaines nouvelles thématiques situées à l'interface de plusieurs instituts du CNRS partagent les difficultés de reconnaissance et de positionnement propres aux sujets interdisciplinaires.

Certains agents peuvent enfin bifurquer¹⁵ vers des thématiques tournées vers les enjeux planétaires, loin de leur discipline d'origine. Les instances du CNRS ne recensent à l'heure actuelle qu'un nombre très limité de demandes de changement de comité d'appartenance au CNRS ou de départ du CNRS rentrant dans ce cadre. Il n'est cependant pas exclu qu'un nombre croissant d'agents expriment le souhait d'abandonner progressivement leur thématique de recherche en physique pour s'impliquer davantage dans des recherches à caractère sociétal. Il est important que les agents puissent assumer ces changements de façon claire et transparente et qu'ils soient accompagnés au mieux dans leur démarche.

Apporter une réponse adéquate à ces questionnements sera l'un des enjeux majeurs auquel le CNRS sera confronté lors de la prochaine décennie. Si elles sont accompagnées et valorisées, ces évolutions individuelles peuvent à la fois répondre à la question du sens, mais aussi ouvrir des pistes nouvelles de recherche qui enrichiront les disciplines et renforcer l'attractivité de la Physique vis-à-vis d'étudiant-es de plus en plus sensibles à ces questions. À l'inverse, si ces questionnements des personnels ne font pas l'objet d'une écoute attentive de la part de l'institution, il existe un risque réel de démission, d'isolement des personnels ou même de *quiet quitting*, ainsi que des difficultés accrues de recrutement de doctorant.e.s, qui pourraient à échéance plus ou moins longue compromettre la dynamique interne des laboratoires.

FAIRE ÉVOLUER LES MODALITÉS D'ÉVALUATION DES MÉTIERS DE LA RECHERCHE

Inciter les personnels techniques à agir en faveur des changements décrits plus haut implique que soient mieux reconnues les actions de maintenance, réparation, adaptation des équipements de recherche, mais aussi d'entretien des bâtiments et de leurs infrastructures. Cette valorisation doit faire jeu égal, pour les évolutions de carrière, avec le montage de nouveaux équipements ou la gestion de grands projets techniques,

¹⁵ lemonde.fr/sciences/article/2022/06/27/ces-chercheurs-tentes-par-la-bifurcation-ecologique_6132235_1650684.html

actuellement bien mieux perçus. Le rôle de référent développement durable devrait également être systématiquement reconnu.¹⁶

Pour les personnels de recherche, l'enjeu est de favoriser et valoriser les actions en faveur de pratiques compatibles avec les enjeux environnementaux, tant pour soutenir les agents déjà engagés que pour favoriser l'engagement de tous dans cette transition. L'un des leviers importants est de cesser de lier la qualité de la recherche au volume de financement obtenu : les moyens financiers sont devenus une mesure de l'excellence de la recherche et ont contribué à forger l'image du *principal investigator* (PI) comme étalon de cette excellence, alors que la transition écologique impose de valoriser la frugalité et l'économie de moyens. Une reconnaissance accrue de l'usage parcimonieux des ressources, une pratique active de la recherche non limitée à de l'encadrement exclusif et mettant en avant la coopération au sein de projets collectifs mutualisant les moyens matériels et compétences apparaissent comme des objectifs salutaires à cet égard. Notons que ceux-ci rejoignent les diagnostics et recommandations pour une évaluation non discriminatoire, en particulier concernant l'équilibre entre dimensions individuelle et collective de l'évaluation.¹⁷

La sensibilisation accrue aux questions de soutenabilité lors de l'évaluation des carrières se posera d'emblée lors des recrutements, aussi bien pour les chercheur·ses que les personnels de soutien à la recherche. Sans limiter le spectre des compétences à recruter, et en relation avec la désaffection possible évoquée plus haut d'une partie du vivier, **il sera essentiel de favoriser l'entrée de nouvelles recrues portant des projets compatibles avec la transition énergétique et environnementale du point de vue des applications ou de nouvelles pratiques en recherche.**

ENJEUX SPÉCIFIQUES DES GRANDES INFRASTRUCTURES ET DU NUMÉRIQUE

TRÈS GRANDES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE (IR*)

Les IR* peuvent être considérées comme un modèle d'utilisation partagée d'un même instrument par la communauté. Néanmoins, compte tenu du poids significatif des grands instruments dans le bilan environnemental de la recherche en physique, ils doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Le CERN, les infrastructures d'astrophysique et de physique des particules, l'ESRF, l'ILL et le laboratoire LNCMI font partie des infrastructures pour lesquelles des BGES

sont disponibles.¹⁸ Comme attendu, la consommation électrique y est un poste clé. En France, l'électricité étant peu carbonée, il s'ensuit des émissions plus faibles qu'à l'étranger (USA, Royaume-Uni, Allemagne...). Dans les années à venir, l'accès à la ressource électrique va néanmoins devenir de plus en plus sollicitée du fait de la nécessité de décarbonation de nombreux secteurs (transports, industrie, chauffage). Il n'est pas exclu que cette concurrence entre IR* et autres usages électriques aboutisse à la nécessité de périodes d'arrêts et conduise à une sélection plus drastique des projets de recherche.

Un point d'attention est également le risque d'une augmentation en fréquence et en intensité d'événements climatiques pouvant affecter les infrastructures (incluant les centres de calculs et de données). Il paraît indispensable de mettre en place les plans de prévention de ces risques.

Parmi les évolutions possibles, il serait d'emblée important d'intégrer davantage les IR* au sein de la société : valorisation de leur chaleur fatale, organisation collective de la possibilité d'interruptions des expériences lors des périodes de tension sur les réseaux électriques ou sur les ressources, etc. Dans le cadre de la réduction de leur consommation électrique, différents leviers techniques peuvent être identifiés. Ainsi, la mise à niveau récente de l'ESRF a permis de réduire la consommation tout en augmentant la luminosité de l'instrument. Une forte consommation énergétique peut être associée à des choix de conception (*European Spallation Source* par exemple), qui pourraient être remis en cause dans le futur. Des évolutions de l'organisation pourraient aussi permettre de profiter au mieux des appareils existants, avec un recrutement de technicien·nes de maintenance et d'opérateur·rices qui pourrait s'avérer un levier essentiel.

L'augmentation de la puissance et de développement des nouveaux instruments s'accompagne par ailleurs d'une augmentation forte du volume de données, nécessitant à son tour l'implantation de *datacenters* dédiés dont le coût environnemental sera élevé.

ENJEUX DU NUMÉRIQUE

Le numérique et son usage omniprésent dans la recherche scientifique possèdent également leurs enjeux spécifiques. Non seulement l'ensemble des personnels utilisent ordinateurs, réseaux et logiciels pour leurs tâches quotidiennes, mais la simulation et le stockage

16 Voir aussi la recommandation du 2/2/2023 du conseil scientifique de l'INP : cnsr.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSL_INP_Recommandation_referents_dev_durable.pdf

17 Jalowiecki-Duhamel, et al., Parité et évaluation non-discriminatoire au CNRS. [Rapport Technique] Comité Parité, Section 14, Comité National de la Recherche Scientifique CoNRS (mandature 2016-2021), 2021. hal-03311372

18 hse.cern/environment-report-2019-2020/emissions ; arxiv.org/abs/2203.12389 ; arxiv.org/abs/2201.08748 ; esrf.fr/files/live/sites/www/files/Infrastructure/Safety/Bilan%20GES%20ESRF%20-%20C3%A9%202018.pdf ; bilans-ges.ademe.fr/bilans/consultation/9395db73-b1cd-11ed-8fce-005056b7acd1/fiche-identite ;

de données prennent également une part croissante dans la recherche en physique, aux côtés de la théorie et de l'expérimentation. Grâce aux travaux du GDS EcoInfo,¹⁹ il a été montré que le numérique pèse 2 à 4 % des émissions mondiales et 10 % de la consommation électrique en France, et est en très forte croissance.

La part liée à la fabrication du matériel est prépondérante et laisse entrevoir des tensions futures sur certains matériaux (pour l'électronique, les batteries, etc.). Une meilleure politique d'achat et de maintenance pourrait améliorer significativement ce poste : garantie étendue, jouvence raisonnée, mutualisation, achat de matériel d'occasion, analyse systématique du cycle de vie du matériel, etc. De telles démarches supposent que les laboratoires aient une visibilité financière suffisante afin de planifier leurs investissements sur plusieurs années.

La part des données est aussi en forte croissance et devrait encore augmenter à l'avenir (données massives issues des grands instruments, déploiement de l'intelligence artificielle). Concernant la Physique, ces données doivent être conservées sur le long terme pour pouvoir être (ré)exploitées ultérieurement. Leur stockage doit donc être fiable mais aussi économe. Les données ne doivent ainsi pas nécessairement être disponibles instantanément mais pourraient être rendues accessibles en quelques jours (données dites froides). Pour répondre à ce défi, les organismes de recherche doivent se doter de véritables plans de gestion de données.

La simulation numérique requiert la même planification face à un développement rapide : la France va accueillir une machine exascale (Jules Verne) dont la consommation annuelle pourrait égaler celle de l'ensemble des laboratoires du CNRS.²⁰ La hausse de consommation d'énergie des centres de calculs, qui offrent un exemple particulier de grande infrastructure de recherche, est par ailleurs vertigineuse : l'IDRIS consommait 1200 kW en 2008, 2500 kW en 2011 et 4500 kW en 2023. Le coût complet GES d'une heure de calcul sur un cœur, estimé à 5 gCO_{2e} dans un mésocentre,²¹ conduit à des émissions importantes pour les grands projets représentant typiquement 10 millions d'heures.

Enfin, rappelons que les avancées majeures en simulation numérique doivent davantage aux progrès algorithmiques qu'à ceux des calculateurs. En outre, la loi de Koomey²² montre qu'à énergie constante, la capacité de calculs double tous les 18 mois. Développer une informatique frugale n'implique donc pas nécessairement une course à des machines de plus en plus grosses, et les efforts de certains centres de calcul pour optimiser les ressources en recyclant par exemple la chaleur fatale (exemple du calculateur Jean Zay) sont à saluer.



Préparation de l'avion Falcon 20 instrumenté du SAFIRE lors de la campagne Exaedre. © Cyril FRESILLON / EXAEDRE / SAFIRE / CNRS Images

¹⁹ ecoinfo.cnrs.fr

²⁰ Le programme HPC recommande de ne pas dépasser 20 MW, soit 175 GWh par an pour une utilisation continue.

²¹ hal.science/hal-02549565. L'analyse faite par GENCI est comparable (5 tCO_{2e} par projet en moyenne, allant jusqu'à 50 tCO_{2e} pour les très fortes demandes)

²² fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Koomey