L'article qui suit est, après un article sur la recherche en astrophysique (J. Knödlseder, *Reflets de la Physique* 82 (2025) 33), le deuxième de la tribune sur l'impact environnemental de la recherche en physique entamée dans le numéro 82 de *Reflets de la Physique* : voir dans ce numéro le texte (page 32) qui appelle la communauté des physiciens à engager un débat sur ce sujet, en conciliant excellence scientifique et responsabilité écologique, et qui invite à partager analyses, expériences et réflexions pour construire une véritable « écologie de la recherche ».

Sobriété expérimentale en action : l'exemple de la microfluidique

Mathilde Van Melle-Gateau, Lionel Bureau, Gwennou Coupier, Élodie Lazzarotto, Élise Lorenceau, Philippe Marmottant et **Delphine Débarre** (delphine.debarre@univ-grenoble-alpes.fr)
Laboratoire Interdisciplinaire de Physique, Université Grenoble Alpes, CNRS, 38000 Grenoble

Les bilans effectués dans de nombreux laboratoires de physique montrent que les activités expérimentales contribuent fortement aux émissions de gaz à effet de serre, notamment via les achats. Si des initiatives émergent pour réduire leur volume (réparation, prêt), une réflexion autour des pratiques expérimentales est moins souvent entreprise. Nous illustrons et discutons ici, à partir de l'exemple de la recherche en microfluidique, une démarche de réduction d'impact intégrant l'ensemble des activités, le cout environnemental des consommables et des équipements utilisés, et reposant sur une coconstruction des solutions.

Grâce au collectif *Labos 1point5*, qui a développé une plateforme permettant de mesurer l'empreinte carbone des laboratoires de recherche (mesurée en tonnes équivalent CO_2 rejetées dans l'atmosphère) et d'identifier comment ces émissions sont réparties entre différents postes, on a aujourd'hui une bonne estimation du « cout CO_2 » des activités de recherche [1,2]. Pour les laboratoires de physique expérimentale, le constat est sans appel : les achats réalisés dans le cadre des activités de recherche pèsent très lourd, loin devant les missions professionnelles, le matériel informatique, le chauffage des bâtiments, ou les déplacements domicile-travail [3,4]. La grande hétérogénéité de cette répartition entre différents postes est plutôt une bonne nouvelle, car elle permet d'envisager les premiers efforts d'ampleur raisonnable à faire pour réduire sensiblement les bilans d'émission de gaz à effet de serre des laboratoires. Pour limiter les achats, différents types d'initiatives sont actuellement expérimentés : mutualisation du matériel informatique, développement de bases de données ou d'outils Internet pour favoriser le prêt de matériel entre équipes, organisation d'ateliers de réparation d'objets. *A contrario*, une réflexion autour des pratiques expérimentales est moins souvent présentée. En outre, comme l'impact écologique des activités de recherche ne se limite pas aux émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel de prendre également en compte la production de déchets (notamment en plastique) et la consommation électrique. Pour que cette réflexion ait un impact, il faut qu'elle débouche sur des modifications sensibles des protocoles expérimentaux mis en place dans les laboratoires, sans toutefois remettre en cause la qualité de la recherche expérimentale.

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683044

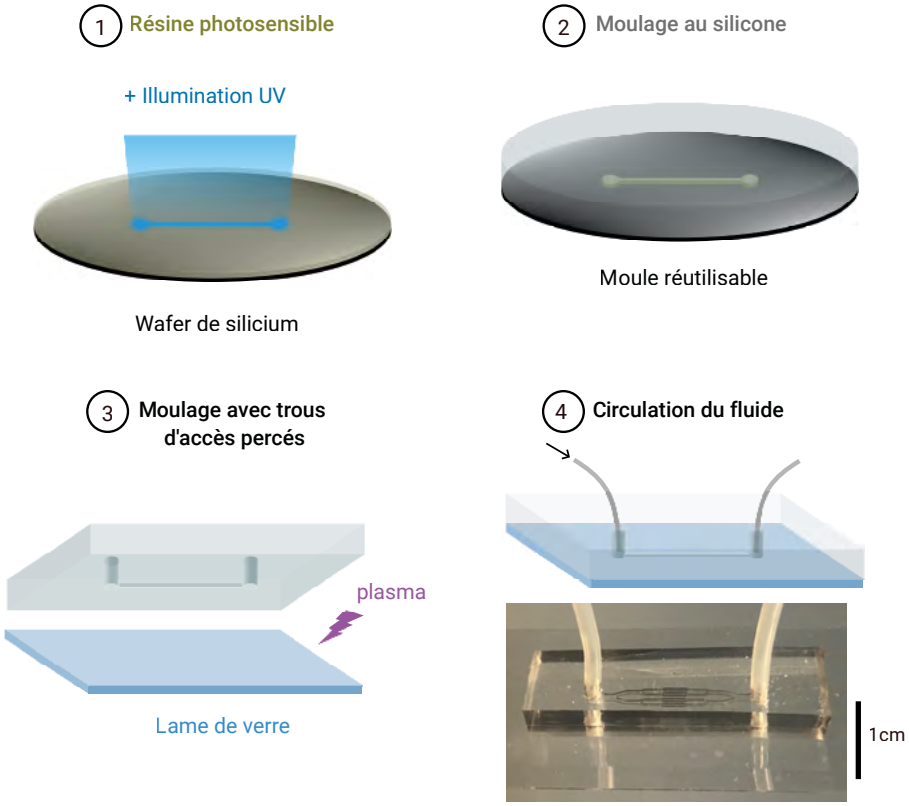
Ce chemin de crête peut sembler souvent étroit. Toutefois, nous montrons ici, à partir de l'exemple de la microfluidique, qu'une fois des actions de sobriété identifiées grâce à une mise en commun des pratiques et une réflexion collégiale, on peut améliorer l'impact environnemental d'un projet de recherche. Nous montrons qu'il est important d'aborder scientifiquement ces changements de pratiques (analyses de cycle de vie, campagnes de mesures) et d'intégrer l'ensemble des personnels concernés dans la démarche afin d'aboutir à des solutions viables, efficaces et suscitant l'adhésion. Nous discutons également les bénéfices associés découlant de cette approche : contribution à la formation des étudiants, diffusion des pratiques reposant sur l'intelligence collective, gain en temps et en argent. Enfin, toujours en nous appuyant sur les cas concrets présentés, nous discutons des obstacles systémiques nécessitant des changements d'ampleur à l'échelle de l'écosystème de la recherche.

La microfluidique comme cas d'école des pratiques expérimentales en physique

La fabrication de dispositifs pour la microfluidique, dont les étapes principales sont résumées dans l'encadré, est un cas d'école intéressant puisqu'elle couvre un ensemble assez représentatif des pratiques de recherche en physique expérimentale : elle implique la consommation énergétique de petits et de gros équipements, ainsi que l'utilisation de consommables en plastique et de matières premières spécifiques. Les principales étapes de cette technique de routine sont réalisées régulièrement au laboratoire en suivant un protocole assez standard, même si celui-ci peut être modifié à la marge pour adapter les dispositifs microfluidiques aux sujets de recherche.

À l'échelle de notre laboratoire, ce cas pratique est pertinent car la quantité de dispositifs fabriqués (environ 200 par an), le nombre de projets de recherche distincts concernés (plus d'une dizaine en permanence), et le maintien de ces besoins sur de nombreuses années justifient l'existence d'une petite salle blanche dédiée et des investissements réguliers en matériel partagé. Les conditions pour une évolution collective et efficace des pratiques sont donc réunies.

PUCE MICROFLUIDIQUE : UTILISATION ET ÉTAPES TYPIQUES DE FABRICATION



Une puce microfluidique est un dispositif permettant de faire circuler des fluides à petite échelle (entre 1 µm et 1 mm), après connexion aux dispositifs d'injections par des tuyaux. Elle permet de mettre en jeu de petites quantités de liquides, de suivre précisément des réactions chimiques, de produire des gouttes ou des capsules, de manipuler et étudier des cellules biologiques… Leur processus de fabrication se décompose en quatre étapes principales :

1 : Photolithographie douce, devant être réalisée en environnement très propre (salle blanche). Cette méthode, issue des techniques de fabrication en microélectronique, consiste à étaler une résine photosensible sur un substrat plat (*wafer* en silicium, généralement) et à exposer aux UV une partie de cette résine selon un motif prédéfini, conduisant à un durcissement de la résine. Le reste de la résine est éliminé chimiquement. Le moule obtenu peut être réutilisé pendant plusieurs années.

2 puis 3 : Moulage et collage de la puce. Cette étape a lieu sous hotte à flux laminaire pour éviter le dépôt de poussières. Du silicone transparent initialement liquide et préalablement dégazé est versé et cuit. Une fois démoulée, la matrice en silicone est percée de trous permettant de connecter les tuyaux puis collée sur un substrat (lame de verre, généralement), après avoir été exposée à un plasma.

4 : La puce microfluidique est alors opérationnelle.

Les actions techniques que nous rapportons ne seraient pas nécessairement strictement transposables dans un autre laboratoire, mais elles illustrent néanmoins ce qu'il est possible de mettre en place au niveau des approches d'analyse des impacts et de quantification, des modalités d'utilisation des équipements, et de l'usage des consommables et matières premières.

>>>

>>>

Quantifier pour agir

Pour ce qui est de commenter la réduction de l'empreinte écologique associée aux activités humaines, le vieux proverbe « l'enfer est pavé de bonnes intentions » est parfaitement adapté, tant le problème est complexe et multifactoriel. Ainsi, pour éviter de mettre en place de « fausses bonnes » mesures augmentant notre impact au lieu de le réduire, il est nécessaire d'avoir une démarche scientifique et de faire un bilan quantitatif avant d'agir, comme illustré par le collectif *Labos 1point5* lors de la mise en place de l'outil GES1point5 [1]. Cette démarche scientifique doit *a minima* s'appuyer sur i) l'utilisation d'outils de quantification à la fois complets mais restant facilement abordables et simples et ii) la définition d'un périmètre d'étude précis et constant afin de pouvoir suivre l'impact des mesures mises en place.

L'analyse du cycle de vie (ACV), qui évalue les émissions associées à la fabrication, au transport, à l'usage et à la fin de vie d'un produit, fait désormais partie des outils normalisés indispensables à une action rationnelle de réduction d'impact [5]. L'ACV fournit une métrique sur laquelle s'appuyer afin d'aller au-delà de la seule intuition et de déterminer quantitativement si une action est vraiment bénéfique. Dans le cadre de l'adaptation d'un protocole expérimental, définir le périmètre d'application de l'ACV implique d'identifier un point d'amélioration potentiel, de chiffrer les émissions actuelles sur ce point et de les comparer à celles de l'alternative envisagée. C'est ce que nous illustrons ici avec l'emploi des *wafers* de silicium servant de substrats pour la photolithographie. Un *wafer* neuf est habituellement employé pour chaque nouvelle géométrie de puce. Les deux seules qualités requises pour ces *wafers* étant leur planéité et leur propreté, la question se pose naturellement du réemploi de ceux-ci : peut-on retirer la résine photosensible formant le moule afin de réutiliser le *wafer* sans perte de qualité ? La solution envisagée consiste à nettoyer les substrats par voie chimique humide en utilisant un mélange oxydant d'acide sulfurique et d'eau oxygénée pour dégrader la résine organique. Les produits utilisés pour le nettoyage ont-ils moins d'impact que l'utilisation d'un *wafer* neuf ? Notre démarche est détaillée sur la figure 1 et permet de conclure que le nettoyage pour réemploi réduit significativement les émissions par rapport à l'usage systématique de *wafers* neufs. Ce type de quantification nécessite d'accéder à des données d'émissions fiables concernant les différentes phases de vie de « l'objet » identifié, et soulève des questions auxquelles il n'est pas toujours aisé de répondre : où sont situés les lieux de production ? comment se fait l'acheminement ? comment sont traités les déchets ? … Dans notre cas d'étude, présenté en figure 1, l'ACV fait notamment apparaitre que le transport n'est pas le poste le plus émissif et représente également le point le plus facile à chiffrer grâce aux bases de données existantes. À l'opposé, les émissions liées à la fabrication sont fonctions du lieu de production (via le « mix énergétique » des pays producteurs) et ne peuvent donc être évaluées qu'avec une grande incertitude. De plus, ces données sont difficiles à trouver car elles concernent des procédés spécialisés, absents des bases généralistes. Identifier des sources de données d'émission (bases de données publiques, études régionales, rapports d'entreprises productrices, données sur les pratiques d'importation du pays…), telles que celles mentionnées dans la figure 1, apparait ainsi primordial pour que l'ACV puisse être réalisée. Le partage de ces sources entre laboratoires pourra faciliter la généralisation de cette démarche de quantification.

Mettre en place des actions : coconstruction et pédagogie

La réduction de l'empreinte environnementale des activités de recherche reste un sujet clivant dans les laboratoires de recherche, notamment lorsqu'elle pourrait paraitre empiéter sur la qualité de la science. Au contraire, elle peut être source de co-bénéfices importants à l'échelle du laboratoire si la démarche adoptée implique un maximum de personnels dans un esprit de coconstruction.

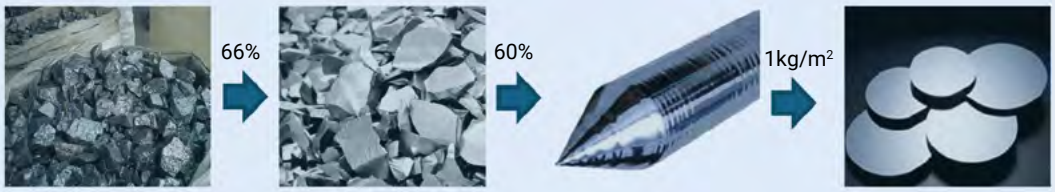
En effet, la mise en place de mesures efficaces repose sur l'adhésion du plus grand nombre d'utilisateurs et d'utilisatrices, notamment lorsque ces mesures mettent en jeu des changements de protocole. Il est donc essentiel que les changements de pratique soient élaborés collectivement, idéalement à l'échelle de l'ensemble des personnels impliqués. La concertation permet d'identifier les contraintes de chaque projet, de profiter des retours d'expérience de tous et de l'intelligence collective qui peut faire émerger des solutions originales, comme illustré sur la figure 2 qui rapporte nos efforts de réduction des déchets en plastique. Cette approche *bottom up* peut sembler plus contraignante et lente à mettre en place qu'une approche *top down* de mise en place d'actions décidées par un petit nombre de participants, mais elle entraine des effets positifs notables : chacun, se sentant impliqué, est plus susceptible d'adopter les changements de pratique proposés et de partager ses propres solutions ; le dialogue ainsi entamé favorise la coopération et la mutualisation autour des expériences ; finalement, ce dialogue peut produire un effet d'entrainement incitant un grand nombre de personnels à entamer une démarche similaire de recherche de sobriété dans d'autres aspects de son activité de recherche : citons par exemple le partage d'équipements de recherche dans une démarche d'alternative à l'achat [6].

D'autre part, il est possible de se saisir de cette démarche de réduction d'empreinte carbone comme d'un outil de formation des étudiants à l'intégration de la question de l'impact environnemental dans leurs pratiques expérimentales. Les impliquer dans la mise en place de protocoles de fabrication d'échantillons permet de leur enseigner (ou de mettre en pratique) des outils de prise en compte de cet impact :

- L'intégration de la contrainte environnementale dès le départ de la construction du protocole la place sur le même plan que les autres contraintes techniques spécifiques à l'expérience, plutôt que de remodeler un protocole existant ayant déjà nécessité un effort de mise au point.
- L'analyse du cycle de vie permet de comparer quantitativement plusieurs solutions (par exemple recyclage ou usage d'un nouveau composant, cf. figure 1), notamment quand les impacts des différentes solutions sont divers (déchets en plastique, solvants, consommation électrique).
- La méthode « budget base zéro déchet » consiste à partir non pas de protocoles existants dont on va réduire le nombre de déchets produits, mais à partir d'un objectif de zéro composant à usage unique

Production

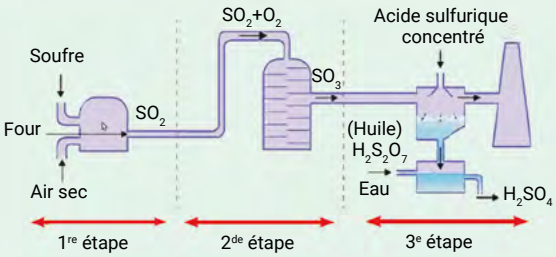
Wafers

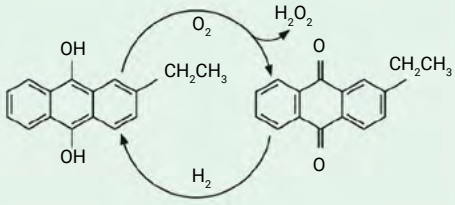


5-15 kg CO_{2eq}/kg | 15-100 kg CO_{2eq}/kg | 10-80 kg CO_{2eq}/kg | 3-10 kg CO_{2eq}/m^2

Total *wafer* selon pays de production[a]: 45-280 CO_{2eq}/m^2

Chimie





Acide sulfurique[b] : 0,15 $kgCO_{2eq}$/kg | **Eau oxygénée[b] : 0,47 $kgCO_{2eq}$/kg**

Transport

Wafers produits en Europe : transport par route sur 1000-3000 km (0,1 $kgCO_{2eq}$/t/km[c]) : **0,1 - 0,3 kg CO_{2eq}/kg**

Wafers produits en Asie : 20000 km par mer (0,01 $kgCO_{2eq}$/t/km[c]) + 1000 km par route : **0,3 $kgCO_{2eq}$/kg**

Produits chimiques européens[d] ; transport par route sur 2000 km (0,1 $kgCO_{2eq}$/t/km) : **0,2 $kgCO_{2eq}$/kg**

Fin de vie

Wafers = déchets inertes en décharge[c] : **0,03 $kgCO_{2eq}$/kg**

H_2SO_4 et H_2O_2 = déchets dangereux[c] : **0,8 $kgCO_{2eq}$/kg**

Calcul

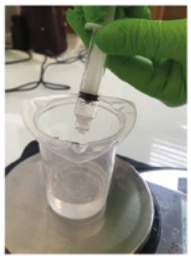
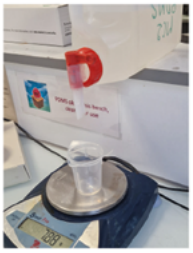
On nettoie 20 *wafers* de 3" de diamètre et 500 µm d'épaisseur (0,1 m^2/0,12 kg)
avec 0,8 L de mélange Piranha (= 1,1 kg H_2SO_4 + 0,23 kg H_2O_2)

Bilan 20 *wafers* neufs : 0,1* [45-280] + 0,12* ([0,1-0.3] + 0,03) = **4,5 - 28 kg CO_{2eq}**

Bilan nettoyage 20 *wafers* : 1,1* (0,15 + 0,2 + 0,8) + 0,23* (0,47 + 0,2 + 0,8) = **1,6 kg CO_{2eq}**

1. Analyse de cycle de vie : le recyclage des *wafers*. La microfluidique par photolithographie utilise des *wafers* de silicium qui peuvent être réemployés après nettoyage dans un mélange d'acide sulfurique et d'eau oxygénée. L'évaluation du bénéfice environnemental de ce réemploi nécessite une analyse de cycle de vie permettant de comparer les émissions associées à la production/transport/fin de vie de *wafers* neufs et des produits utilisés pour le nettoyage. Nous montrons ici que le réemploi permet de réduire les émissions d'un facteur 3 à 18 selon la provenance des *wafers*.

(a) https://cutt.ly/legifrance_article_jo
(b) www.astee.org/ressources
(c) https://base-empreinte.ademe.fr/
(d) https://lelementarium.fr

	Fabrication	Utilisation
Diagnostic	 Dosage imprécis → excès de PDMS préparé Plastique à usage unique (seringue, bécher)	100% de plastique à usage unique : circuit, tuyaux, seringue
Déchets	**25-35 g de plastique jeté par moulage** (hors gants de protection)	**10-20 g de plastique jeté par expérience**
Action	 • Ergonomie des contenants améliorée • Suppression/réutilisation du plastique à usage unique	Questionner au cas par cas la réutilisation : • du circuit • des tuyaux • de la seringue → Protocole de nettoyage avec un minimum d'impact (surfactant, éthanol, autoclavage selon besoin)
Gain	• **100% de réduction des déchets en plastique** (hors gants de protection et circuit microfluidique lui-même) • **50% de réduction des déchets papier** **Sur 200 moulages/an :** **- 5-7 kg de plastique jeté**	**Jusqu'à 100% de réduction des déchets en plastique** (hors gants de protection) **Sur 1000 expériences/an :** **- 5-20 kg de plastique jeté**

Étapes permettant un travail pédagogique avec les étudiants sur l'intégration de l'empreinte environnementale dans la conception des protocoles d'expérience

2. Au-delà de l'empreinte carbone : la réduction des déchets en plastique. La microfluidique repose sur l'utilisation massive de plastique à usage unique. Limiter les déchets en plastique permet d'améliorer le bilan environnemental des expériences et de former les étudiants à l'intégration de cette contrainte dès la conception des protocoles de fabrication d'échantillons.

>>>

(ou zéro émission de gaz à effet de serre), puis de questionner la nécessité de chaque déchet en réfléchissant à des solutions alternatives. Le déchet n'est ainsi produit que dans le cas où aucune alternative réutilisable ne peut être trouvée. Ceci permet de questionner plus efficacement des points considérés comme établis (la puce microfluidique à usage unique est-elle forcément à usage unique ?) et nécessite de réfléchir à chaque étape aux contraintes spécifiques à l'expérience qui peuvent influer sur certaines décisions (en fonction de ce qui est injecté, la puce et les tuyaux la connectant peuvent-ils être réutilisés ?).

La construction d'un arbre de décision en fonction des contraintes de chaque expérience permet d'introduire une flexibilité dans les protocoles mis en place assurant qu'ils puissent être utilisés, au moins partiellement, dans la majorité des cas.

Les étudiants ainsi formés peuvent alors transposer ces approches à l'ensemble de leur activité expérimentale, ce qui augmente d'autant l'impact de la démarche.

Moyens techniques, moyens humains

La mise en place de ces actions de réduction d'impact illustre aussi les limites auxquelles se heurtent trop souvent les laboratoires et les personnels désirant adapter leurs pratiques de recherche dans un contexte de crise environnementale : la recherche en physique s'est construite sur une abondance de ressources matérielles et d'énergie. Les comportements des personnels de recherche et de leurs tutelles ne sont pas spontanément orientés vers la sobriété, dont la valorisation commence à peine dans les évaluations collectives (laboratoires) comme individuelles.

Or, la mise en place des actions de réduction d'impact représente un cout humain qui est encore trop peu intégré et encore moins valorisé pour leurs évolutions de carrière. À titre d'exemple, le recyclage de 20 *wafers* de silicium (permettant d'économiser entre 3 et 26 $kgCO_{2eq}$) représente 4 h de travail de personnel de soutien technique ; les commander neufs demande 10 minutes de travail. De façon générale, la généralisation de l'approche présentée ici requiert d'y consacrer des moyens humains et implique que soient mieux reconnues les actions de maintenance ou d'adaptation des équipements et protocoles de recherche.

De façon similaire, les volontés d'adaptation au sein des laboratoires se heurtent fréquemment à des questions matérielles qui limitent l'impact des démarches entreprises. Cette problématique est illustrée par notre analyse et notre action sur la consommation énergétique associée à la microfluidique au laboratoire (figure 3) : les différents postes de consommation électrique identifiés peuvent faire l'objet d'actions adaptées pour réduire leur impact, avec des actions de complexité croissante (modification du mode d'utilisation, achat de petit matériel, modification simple de l'appareil, jouvence majeure de l'équipement) associées à des réductions de plus en plus significatives (augmentation d'un ordre de grandeur d'une action à l'autre). Moduler, en fonction de son utilisation ou non, l'insufflation en salle blanche (garante de la propreté poussée nécessaire à la microfabrication) sera l'action la plus impactante. Cependant, sa mise en place nécessitera un effort particulièrement chronophage : articulation avec les professionnels extérieurs au laboratoire spécialisés dans les équipements de salle blanche, mesure précise de la propreté, et surtout évaluation du maintien de la qualité de la fabrication des dispositifs. Elle demandera d'une part l'adhésion et la participation des utilisateurs, qui auront été facilitées par la mise en place des « petits gestes » individuels, et d'autre part la reconnaissance par les tutelles du travail réalisé, de l'intégration dans les fiches de poste à la valorisation lors des promotions.

Ainsi, si les premières mesures peuvent être mises en place facilement, et si elles permettent une sensibilisation des personnels permanents ou en formation, seule une réponse systémique rend accessible une réduction majeure d'impact une fois ceux-ci quantifiés et les leviers d'action identifiés [7]. Un enjeu est donc d'articuler les décisions d'action à l'échelle du laboratoire (pour permettre une approche en adéquation avec la culture et les contraintes scientifiques des personnels) et un soutien institutionnel à une échelle plus globale.

Conclusion

Nous avons illustré sur un exemple représentatif de la recherche expérimentale en physique comment initier une démarche de réduction des consommations électriques, émissions et pollutions de l'activité de recherche, en associant quantification des impacts, nouvelles pratiques et adaptations matérielles. Le bénéfice de cette démarche, qui va dans le sens d'une réduction de la pression globale sur notre écosystème Terre, a aussi deux retombées positives immédiates : premièrement, elle permet d'engager le dialogue autour de l'impact écologique de la recherche avec un grand nombre de personnels du laboratoire, notamment les personnes en formation. Deuxièmement nous avons constaté une augmentation de la coopération dans le laboratoire, y compris au-delà du champ environnemental.

Plus généralement, il est instructif d'analyser notre démarche selon différents niveaux d'action pour faire évoluer notre écosystème de recherche : à l'échelle individuelle, à l'échelle collective (laboratoire) et au niveau des instances.

Au niveau individuel, se focaliser sur tout le processus associé à un domaine de recherche permet d'agir à petite échelle, celle de son propre travail, sans être dépassé par la grandeur des échelles planétaires. Ceci est utile à un moment où nos instances communiquent beaucoup sur les problématiques environnementales, ce qui peut générer de l'anxiété à l'échelle individuelle... s'il n'y a pas de traduction concrète de ces injonctions dans le quotidien du laboratoire ! Ici nous avons montré qu'il est aisé de faire le bilan des avancées, ce qui remet du sens et permet de voir un horizon réalisable pas à pas.

Au niveau collectif, ces réflexions permettent de bâtir une culture commune au laboratoire, et d'identifier d'autres gisements de réduction des impacts environnementaux. De tels progrès supplémentaires nécessiteront un changement important des mentalités, en acceptant de consacrer officiellement du temps de travail à cette tâche, et aussi d'affecter des personnels spécifiquement sur ces enjeux. Un budget en ressources humaines est donc à prévoir pour recruter, ainsi qu'une valorisation du temps consacré pour les personnels en poste pour la formation et l'adaptation de nos pratiques.

>>>

Impact et complexité croissants

Mesure

Wattmètre équipements individuels
x
Consommation moyenne

Retour utilisateurs :
Temps moyen d'utilisation

Accès aux données des sous-compteurs électriques du bâtiment
+ analyse des données temporelles
→ consommation salle blanche

Consommation	**Pompe à vide** (dégazage PDMS) **100 W** 30' / utilisation **10 kWh /an**	**Étuve 65°** (cuisson PDMS) **1000 W** (chauffe 3') **30 W** (maintien) Équipement partagé et sans minuteur en continu 9 mois/an **200 kWh /an**	**Hotte** (collage PDMS) **300 W** Fonctionnement continu pour maintien propreté **2700 kWh /an**	**Salle blanche** (lithographie sur wafer) **7 kW** Fonctionnement continu pour maintien propreté **60 MWh /an**
Action	Arrêt de la pompe après 3' et fermeture de la cloche Qualité dégazage inchangée ✓	Insertion d'un minuteur de 2h Qualité de cuisson inchangée ✓	Pose d'un rideau de fermeture et extinction hors utilisation Qualité/propreté du collage inchangées ✓	« Mode dégradé » (-80% débit d'air insufflé) nuits et week-ends ou en l'absence d'utilisateurs Nécessite un protocole de contrôle de la qualité de l'air et des dispositifs produits
Gain	**9 kWh /an** **0,6 kg CO_{2eq}/an**[(a)] **2 € /an**[(b)]	**180 kWh /an** **11 kg CO_{2eq}/an** **36 € /an**	**2700 kW /an** **162 kg CO_{2eq}/an** **540 € /an**	**35 MWh/an** **2100 kg CO_{2eq}/an** **7000 € /an**

(a) Base 0.06 kg /kWh sur le mix français (b) Tarif réglementé EDF ~ 0.2 €/kWh

3. Quantifier pour réduire : la consommation électrique liée à la microfabrication. La préparation des puces en silicone nécessite des étapes de mélange et dégazage, de cuisson puis de collage du silicone sur un substrat. Ces étapes font appel à de l'appareillage électrique qui en utilisation « standard » peut conduire à des consommations électriques non nécessaires. Quelques aménagements peu complexes et une formation rapide des utilisateurs peuvent permettre de réduire ces consommations.

1• https://apps.labos1point5.org

2• A. Esteez-Torres *et al.*, "Carbon footprint and mitigation strategies of three chemistry laboratories", *Green Chem.* **26** (2024) 2613-2622; https://doi.org/10.1039/D3GC03668E

3• www.cnrs.fr/fr/actualite/transition-bas-carbone-un-plan-ambitieux-pour-le-cnrs

4• M. De Paepe *et al.*, "Purchases dominate the carbon footprint of research laboratories", *PLOS Sustainability and Transformation* **3**(7) (2024) e0000116; https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000116

5• https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie

6• www.inp.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-matostheque-un-outil-pour-partager-du-materiel-scientifique-dans-son-laboratoire

7• E. Lacaze *et al.*, « Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en physique », CNRS-INP. 2023. hal-04255371

8• https://fr.wikipedia.org/wiki/Chimie_verte

>>>

Au niveau des instances, les budgets en ressources humaines et la valorisation du travail peuvent être soutenus par les politiques de recherche, pour encourager cette dynamique sur le long terme.

Pour finir, au lieu de considérer ces adaptations uniquement au prisme des contraintes qu'elles induisent, on peut imaginer qu'elles ouvrent des perspectives pour la recherche en physique, à l'instar de la « chimie verte » dans les années 1990 [8].

Nous remercions Danièle Centanni pour sa contribution pratique au recyclage des wafers.