

Réduction de l'empreinte environnementale des activités scientifiques spatiales

Simon Baillarin, Etienne Berthier, Cédric Lothoré, Aurélie Marchaudon, Héroïse Méheut (co-animatrice), Bruno Millet (co-animateur), Pierre Omaly, Françoise Perrel, Thierry Pellarin, Alexandre Santerne, Aymeric Spiga

1 INTRODUCTION

L'influence humaine est sans équivoque sur le climat planétaire et sur la crise de la biodiversité. Ces impacts, déjà ressentis aujourd'hui, iront en s'aggravant à l'avenir en l'absence de changements profonds de trajectoire sur les plans politiques, sociaux, économiques, environnementaux et technologiques. Le CNES ainsi que 15 autres organismes de recherche français ont pris l'engagement¹ de donner l'exemple pour permettre à la France d'atteindre son objectif de neutralité carbone d'ici 2050 ; ce rapport identifie la trajectoire qui en découle pour le spatial scientifique.

Les activités spatiales, notamment scientifiques, se trouvent donc confrontées à des enjeux forts de réduction de leur empreinte environnementale. Le secteur du spatial scientifique a d'autant plus conscience de l'importance de ces enjeux qu'il contribue activement à les caractériser. De plus, l'avenir du spatial ne peut non plus s'appréhender sans la prise en compte de la saturation des orbites, de la multiplication des débris spatiaux (cf. Syndrome de Kessler) et de la pollution lumineuse et radioélectrique.

Le Groupe Spécifique 5 (GS5) s'est concentré sur l'empreinte environnementale des moyens spatiaux utilisés par la communauté scientifique française pour des travaux académiques. Ce périmètre inclut en particulier les sciences de l'observation de la Terre et de l'Univers ou de l'exploration du système solaire, et plus généralement l'ensemble des thématiques scientifiques du CNES. Cette réflexion ne peut être conduite en vase clos, et le GS5 a également considéré les évolutions du secteur spatial hors domaine académique (télécommunication, NewSpace, etc.). Il s'est nourri de 9 interviews avec des acteurs variés, plus ou moins proches du spatial, membres de

la communauté scientifique, des agences spatiales ou de l'industrie.

Les objectifs du GS5 sont :

1. De proposer une estimation des ordres de grandeur de l'empreinte environnementale de différents types de projets spatiaux scientifiques ;
2. D'identifier au sein de l'ensemble des étapes d'un projet spatial, les axes offrant un potentiel de réduction significative de leur empreinte environnementale ;
3. De se projeter dans le futur (2030, 2050) pour penser l'évolution du spatial scientifique à l'aune des bouleversements environnementaux à venir.

2 EMPREINTES ENVIRONNEMENTALES

2.1 CONSTAT

Le secteur spatial ne participe aujourd'hui qu'à un faible pourcentage ($\leq 1\%$)² de l'empreinte environnementale mondiale anthropique. Cependant, sa croissance, notamment avec l'émergence du NewSpace, permet d'imaginer une augmentation significative de sa contribution ($\approx 5\%$) en quelques années. Chaque contributeur à l'empreinte carbone doit prendre part à la réduction globale, les scientifiques qui ont mis en évidence le problème, en particulier³.

Enfin, le secteur spatial constitue, par nature, l'une des seules activités humaines affectant directement toutes les couches de l'atmosphère et au-delà, tout en concourant à la pollution des océans et de leurs abysses :

- La phase propulsée d'un lanceur ainsi que la rentrée atmosphérique d'objets artificiels (étages supérieurs de lanceurs, satellites,

¹ <https://presse.cnes.fr/fr/la-recherche-au-service-de-la-transition-ecologique-et-du-developpement-soutenable-16-organismes>

² <https://www.iacpartners.com/en/the-space-industrys-path-to-a-sustainable-future>

³ Pour la part de la science dans le spatial : https://brycetek.com/reports/report-documents/Bryce_2022_Global_Space_Economy.pdf

stations orbitales, etc.) impactent la stratosphère et la couche d'ozone⁴ ;

- Les polluants plus ou moins volatils dus à la combustion des ergols de lanceurs, la retombée nominale ou accidentelle d'étages de lanceurs en zone proche ou lointaine de la base de lancement vient contaminer les écosystèmes marins déjà fragilisés par l'acidification et le réchauffement des océans.

Ainsi, les activités spatiales ne peuvent s'exonérer de leur part liée à la contamination des sols, de l'air et de l'eau et à la destruction de la biodiversité. Si elles offrent une capacité à mesurer les phénomènes en jeu, elles font aussi partie du problème posé.

2.2 METHODE

Les connaissances actuelles ne permettent pas de quantifier de manière précise et exhaustive les contreparties environnementales des activités spatiales. En effet, le périmètre des activités (lanceur, satellite, segment sol, station spatiale, observation de la Terre, exploration de l'univers, exploitation planétaire, tourisme spatial, etc.) est si large et les phases de vie de l'objet considéré si entremêlées que l'estimation des impacts environnementaux liés à l'ensemble des missions s'avère exigeante, minutieuse et complexe.

La méthode la plus communément adoptée consiste à réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV) de l'ensemble des composantes du système. Appliquée au secteur spatial, elle passe donc par la caractérisation précise de l'ensemble des activités de sa chaîne de valeur depuis l'extraction et la transformation des matières premières, la fabrication et le transport de chaque pièce élémentaire jusqu'à l'intégration finale, le lancement, l'exploitation et la fin de vie. La mise en œuvre d'une ACV complète est donc un défi pour les acteurs du spatial. Les résultats issus d'une ACV peuvent de plus être difficiles à appréhender pour un public non initié, par la multiplicité des indicateurs d'impacts, 16 par exemple pour la méthode Product Environmental Footprint (PEF). Par construction, cette méthode n'inclut pas des problématiques comme la confiscation des orbites, la génération des débris ou la pollution lumineuse et radioélectrique.

2.3 OUTIL ET HYPOTHESES

Le CNES dispose d'un outil simplifié, OASIS (Orbital projects : Assessment of Simple environmental Impacts Software) d'estimation de ces impacts, destiné à l'analyse des projets spatiaux. Il reprend les indicateurs du PEF comme la contribution au changement climatique, la consommation de ressources fossiles, minérales et d'eau et condense les autres en 2 catégories : l'impact sur la biodiversité et sur la santé humaine. Cet outil constitue un compromis entre les outils grand public de comptabilité d'impacts environnementaux, trop généralistes et donc non adaptés au secteur spatial, et les outils d'ACV présentés ci-dessus. Il s'adresse aux équipes projet, non-expertes des méthodes d'ACV, pour estimer l'impact environnemental des composantes dont elles sont responsables. Il s'appuie sur une définition paramétrique d'un projet spatial, limitée à ses composantes majeures (durée de développement, masse du satellite, type de lanceur, etc.). Le calcul des impacts environnementaux est notamment basé sur des abaques issus de résultats d'ACV existantes.

L'outil a cependant des limites : le segment sol est plus approximatif que le segment spatial et les déplacements domicile-travail, les activités non récurrentes liées au développement du lanceur, ainsi que les applications « aval » sont omises.

Les résultats fournis par l'outil OASIS ont été corroborés par une comparaison, à périmètre équivalent, à ceux obtenus avec une ACV conventionnelle d'un projet orbital, l'instrument Athena X-IFU en l'occurrence.

Tous les résultats présentés ici s'appuient sur une exploitation rigoureuse de l'outil. Dans la version utilisée (datée à fin 2023), si sa précision concernant les valeurs absolues estimées doit gagner en maturité, elle est suffisante pour mener une étude comparative entre différents scénarios telle qu'exposée présentement.

2.4 SCENARIOS

Le GS5 a défini différents scénarios de missions scientifiques spatiales caractérisées par plusieurs aspects : la coopération, le gabarit

⁴ Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate : <https://doi.org/10.1029/2021EF002612>

et le nombre de satellites, la localisation de la base de lancement, la durée de la phase de développement et de la phase d'exploitation, la performance lanceur requise, la puissance de calcul pour les (re)traitements scientifiques, le mix énergétique des zones géographiques impliquées, etc.

Au total, 13 scénarios permettent une cartographie relativement couvrante des schémas envisageables :

#	Type	Coopéra.	Gabar.	Lance.	Durée dével.	Durée exploi.	Coût
1	LEO ⁵	France	1 000 kg	S. Am.	10 ans	10 ans	M
2	LEO	Europe	1 000 kg	S. Am.	12 ans	10 ans	M
3	LEO	Asia	1 000 kg	Asia	14 ans	10 ans	M
4	LEO	N. America	2 000 kg	N. Am.	15 ans	5 ans	M
5	LEO	Europe	200 kg	S. Am.	14 ans	5 ans	S
6	LEO	France	10 kg	S. Am.	4 ans	2 ans	S
7	LEO	France	10 kg	Kaz.	4 ans	2 ans	S
8	LEO	France	50 × 30 kg	Japan	6 ans	8 ans	M
9	LEO	France	12 × 300 kg	S. Am.	6 ans	10 ans	M
10	L2 ⁶	World	4 000 kg	N. Am.	25 ans	15 ans	L
11	L2.	Europe	4 × 1 500 kg	S. Am.	25 ans	15 ans	L
12	Rover ⁷	N. America	400 kg	N. Am.	10 ans	4 ans	M
13	Orbiter ⁸	Europe	5 300 kg	S. Am.	20 ans	6 ans	L

Les éléments de coûts respectent la classification suivante :

- S (Small) : Coût ≤ 250 M€ ;
- M (Medium) : 250 M€ < Coût ≤ 1 G€ ;
- L (Large) : Coût > 1 G€.

En revanche, l'estimation de l'empreinte environnementale des vols habités et de l'exploration humaine de corps céleste n'a pas été faisable, car les outils actuels ne le permettent pas.

2.5 RÉSULTATS

L'estimation de l'empreinte environnementale de chaque scénario de mission a permis d'identifier leurs points saillants en matière environnementale. Le GS5⁹ s'est concentré sur l'empreinte carbone, même si les autres

composantes (telles que listées ci-avant) doivent être aussi nominalement appréhendées.

Les enseignements sont les suivants :

- Hormis les 3 premiers, les 10 autres scénarios ne sont pas comparables en termes d'empreinte puisqu'ils ne répondent pas à des envergures programmatiques (objectifs, durées et coûts) équivalentes. La similarité des unités fonctionnelles est absolument primordiale dans une analyse comparative de cycle de vie ;
- En revanche, la comparaison des 3 premiers scénarios permet d'appréhender les conséquences de la coopération sur l'empreinte carbone. L'effet (dé)centralisation (régionalisation versus internationalisation) associé à l'allongement des phases de développement est mis en évidence (Fig. 1) ;
- De manière générique, les 3 contributeurs majoritaires sont (Fig. 2) : (i) la fabrication de la composante spatiale, (ii) l'intégration et les tests de cette même composante (AIT : Assembly, Integration and Test) et (iii) le lancement. Leurs poids relatifs dépendent du scénario. L'AIT est un fort contributeur car les exigences thermiques, hydrométriques et de propreté à respecter ainsi que les tests d'environnement (mécaniques et thermiques) font appel à des moyens techniques énergivores. De plus, en cas de partenariat, les activités AIT sont menées sur plusieurs sites, accompagnées de transports de matériels entre les sites ;
- Si l'empreinte totale est proportionnelle à la taille du projet (masse du satellite, durée des phases), l'empreinte ramenée au kg est inversement proportionnelle à la masse du satellite dans le cas d'un objet unique (Fig. 3).

Ce dernier point est relativement contre-intuitif et mérite une attention particulière. Même si une petite mission présente une empreinte carbone individuelle plus faible, la multiplication de ces missions, peu onéreuses, conduit à une explosion de l'empreinte totale ; un effet rebond en contradiction avec l'objectif recherché.

⁵ LEO : Low Earth Orbit.

⁶ L2 : Point de Lagrange 2.

⁷ Rover : « Atterrisseur » sur un corps céleste, sans plus de précision.

⁸ Orbiter : Sonde orbitale autour d'un corps céleste, sans plus de précision.

⁹ Avec la contribution significative de la société SCALIAN (Xavier Loizillon) sur l'année 2023.

Le poids des déplacements professionnels dépend naturellement de l'ampleur de la coopération sur laquelle les organisations s'appuient pour le développement et l'exploitation de la mission. Plus les acteurs sont nombreux et éloignés, plus le partage de responsabilité est complexe, plus le coût environnemental lié à la mobilité est élevé.

Au-delà des points saillants, toutes les activités doivent être étudiées avec précaution au profit

d'éventuelles économies « carbone ». Le (re)traitement des données, leur archivage (stockage) et leur distribution n'échappent pas à l'objectif, même si les résultats actuels ne révèlent pas d'empreinte exagérée, pour les scénarios considérés et avec les hypothèses actuelles de l'outil données ci-dessus.

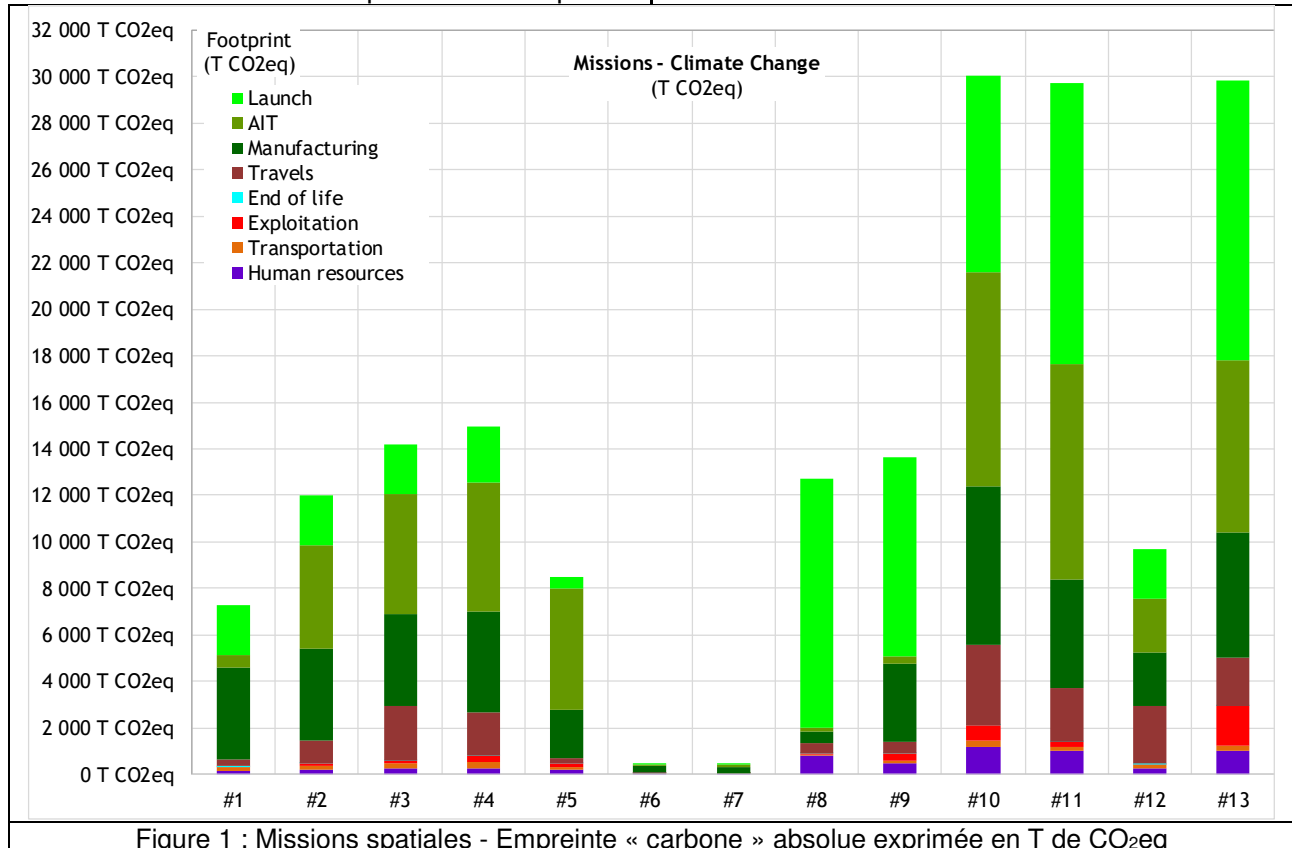


Figure 1 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » absolue exprimée en T de CO₂eq

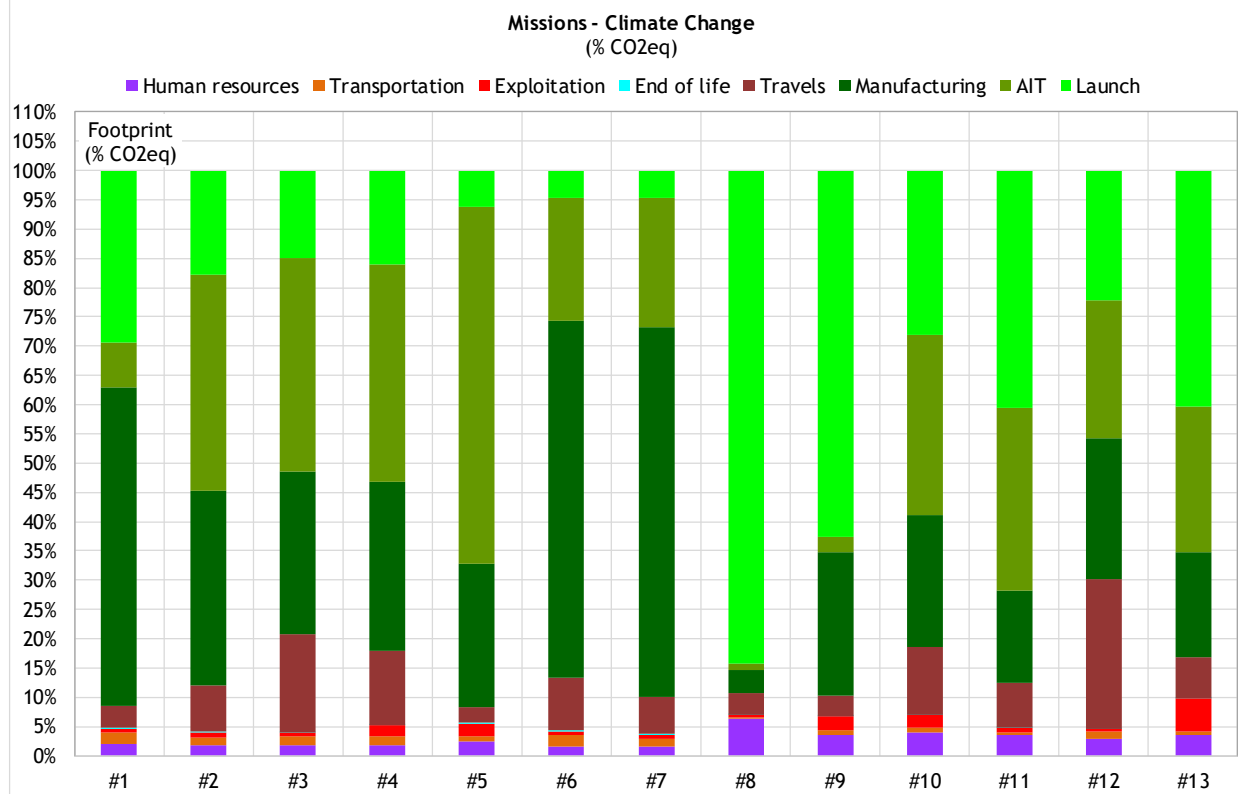


Figure 2 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » relative exprimée en % de CO₂eq

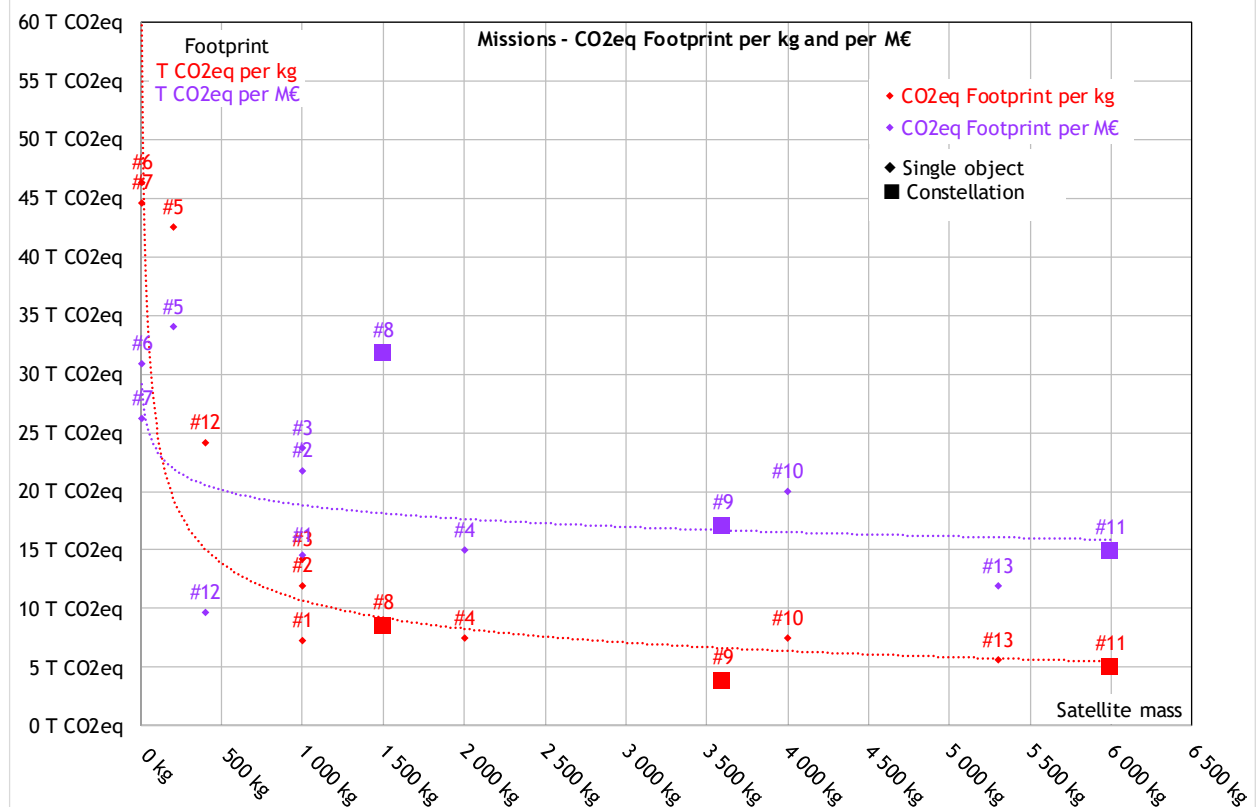


Figure 3 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » exprimée en T de CO₂eq ramenée au kilogramme et au M€ en fonction de la masse de la composante spatiale (satellite ou cumul des satellites composant la constellation)

3 AXES DE REDUCTION

L'objectif de neutralité carbone d'ici 2050 implique de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un facteur 6 par rapport à 1990 (Plan Climat, Stratégie Nationale Bas Carbone, Pacte Vert pour l'Europe). Cela correspond actuellement à une trajectoire à hauteur de -7%/an (pour un début de transition en 2025), sachant que tout délai dans la mise en œuvre résultera en une trajectoire plus abrupte (-8,5%/an à partir de 2029). Aussi, avons-nous fait la distinction entre les mesures à court terme (CT, soit d'ici 2025) et les mesures à moyen terme (MT, soit d'ici 2029). Les mesures à plus long terme, qui doivent apporter les changements les plus profonds sont abordés au chapitre #4.

Cette trajectoire de -7% par an s'applique à l'ensemble des secteurs d'activités français et européens, celui du spatial y compris. La recherche et par conséquent les activités scientifiques spatiales françaises doivent respecter la trajectoire de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)¹⁰, fortement soutenue par une vaste communauté scientifique française¹¹. En conclusion, le GS #5 recommande donc d'appliquer cette trajectoire de -7% par an à l'ensemble des activités spatiales scientifiques françaises, indépendamment de leurs bénéfices sociétaux. L'analyse précédente de scénarios de missions spatiales montre que les émissions de gaz à effet de serre sont principalement liées aux campagnes de lancements, aux AIT, à la production du satellite, ainsi qu'aux déplacements professionnels des personnels impliqués dans ces missions. Il n'existe donc pas un seul segment très émetteur sur lequel devrait peser tous les efforts. De plus, l'analyse a été menée pour les seules missions spatiales alors qu'il faut considérer toutes les échelles d'intervention depuis le financement de la recherche en lien avec le spatial (APR, doctorats, R&T, etc.) jusqu'au rôle du CNES comme acteur international auprès des autres agences spatiales.

Par tradition et motivée par une conscience accrue, la France a toujours adopté une

position de pionnier en matière de réglementation spatiale au bénéfice de la protection de l'environnement et de l'espace dans lesquels l'activité évolue.

Nous identifions 5 axes de réduction de l'empreinte environnementale du spatial scientifique.

3.1 QUANTIFIER ET SUIVRE LES ÉMISSIONS DE GES

Afin de mener une transition environnementale efficace et juste, il est primordial de continuer les efforts de quantification de l'empreinte du spatial scientifique (à CT), ce que nous avons initié pour les missions (cf. chapitre #2). Cette quantification prendra en compte tout le périmètre du spatial scientifique, incluant les activités de recherche financées par le CNES, l'utilisation des ressources numériques (de la conception à l'exploitation des moyens, y compris le stockage), ainsi que les lancements. Il s'agit d'un périmètre différent de celui considéré par le CNES pour ses BEGES (Bilans d'Émissions de Gaz à Effet de Serre).

Les actions à mettre en place sont :

- De quantifier annuellement les émissions de GES prévisionnelles des dossiers de candidature aux appels à projet de recherche (APR), dès l'appel 2025. Une méthodologie claire et un outil commun doivent être fournis aux porteurs de projets, en s'appuyant par exemple sur ceux développés par le GdR Labos 1point5. Les bilans d'utilisation des crédits devront également quantifier, grâce à ces mêmes outils, les émissions de GES effectuées ;
- D'estimer les impacts environnementaux, et notamment les émissions de GES, des projets de R&T et mener des ACV systématiques de tous les projets spatiaux dans lesquels le CNES est impliqué (CT). Ces ACV comporteront une dimension temporelle (passée, actuelle et future) sur toute la durée de vie des missions et projets R&T afin de pouvoir suivre leur évolution dans le temps ;
- D'évaluer annuellement (CT) les émissions de GES des infrastructures sols nécessaires au développement et aux opérations des

¹⁰ Blanchard M, Bouchet-Valat M, Cartron D, Greffion J, Gros J (2022) Concerned yet polluting: A survey on French research personnel and climate change. PLOS Clim 1(9): e0000070. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000070>

¹¹ Contribution émanant de la communauté scientifique (recueillant plus de 200 signataires) au Séminaire de Prospective Scientifique du CNES 2024 sur la thématique « Empreinte environnementale des activités scientifiques spatiales ».

projets spatiaux (salles blanches, moyens de test, d'intégration, de calcul et stockage, base de lancement, activités et moyens de calibration et de validation, etc.) à partir d'une méthode commune ;

- De financer en urgence les activités de recherche sur l'empreinte environnementale des activités spatiales pour adapter au plus juste les scénarios de transition (Fig. 4, 5, 6 et 7)¹².

		Environmental footprint of the space segment		
Topics		Development	Exploitation	Disposal
	Planetary boundaries			
	Climate change	Significant	None	Unknown Thesis proposal
	Aerosol loading	Low	None	Unknown Thesis proposal
	Ozone depletion	Low	None	Unknown Thesis proposal
	Land system change	Low	None	Unknown
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	None	Unknown
	Freshwater use	Low	None	Unknown
	Novel entities	Unknown Significant?	None	Unknown
Mineral resources depletion		Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	Executioner or victim	Significant
	Dark sky	None	Significant (LEO satellites)	Unknown
	Quiet sky	None	Significant (Telecom)	None

Figure 4 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Space segment »

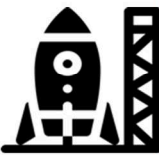
		Environmental footprint of the launch segment		
Topics		Development	Exploitation	Disposal
	Planetary boundaries			
	Climate change	Significant	Unknown Thesis proposal	Unknown Thesis proposal
	Aerosol loading	Low	Unknown Thesis proposal	Unknown Thesis proposal
	Ozone depletion	Low	Unknown Thesis proposal	Unknown Thesis proposal
	Land system change	Low	None	Unknown None?
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	Unknown	Unknown
	Freshwater use	Low	Unknown	Unknown
	Novel entities	Unknown Significant?	Unknown	Unknown
Mineral resources depletion		Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	Low	Significant
	Dark sky	None	Low	Unknown
	Quiet sky	None	None	None

Figure 5 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Launch segment »

¹² L'estimation de l'empreinte environnementale des différentes composantes est issue des travaux menés avec l'écosystème

industriel français en 2023, complétés et validés dans le cadre du GS #5.

		Environmental footprint of the ground segment		
Topics		Development	Exploitation	Disposal
 Planetary boundaries	Climate change	Significant	Significant	Low
	Aerosol loading	None	None	None
	Ozone depletion	None	Low	None
	Land system change	Unknown	Unknown	Unknown
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	Low	Low
	Freshwater use	Unknown	Unknown	Unknown
	Novel entities	Unknown	Unknown	Unknown
Mineral resources depletion		Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	None	None
	Dark sky	None	None	None
	Quiet sky	None	None	None

Figure 6 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Ground segment »

Topics		Environmental footprint Research work to be carried out
Planetary boundaries	Climate change	Unknown Thesis proposal
	Aerosol loading	Unknown Thesis proposal
	Ozone depletion	Unknown Thesis proposal
	Land system change	Unknown Research studies to be suggested
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	No, because no impact
	Biosphere integrity	Unknown Research studies to be suggested
	Ocean acidification	Unknown Research studies to be suggested
	Freshwater use	Unknown Research studies to be suggested
	Novel entities	Unknown Research studies to be suggested
Mineral resources depletion		No, because LCA/Database
Into orbit	Space debris	No, because under investigation
	Dark sky	Need to carry out activities: to be confirmed
	Quiet sky	No, because under investigation

Figure 7 : Synthèse des recherches académiques à mener au bénéfice de la quantification de l'empreinte environnementale du secteur spatial

3.2 METTRE EN PLACE DES BUDGETS CARBONES AINSI QUE LA TRAJECTOIRE DE RÉDUCTION

Une fois le bilan des GES établi sur l'ensemble des activités du spatial scientifique, il s'ensuit :

- De mettre en place un budget d'émissions de GES (CT) pour l'ensemble des projets APR (éventuellement par sous-groupes thématiques) sur la base de l'évaluation faite. Ces budgets doivent s'accompagner

d'une évolution temporelle qui suit la trajectoire choisie (-7% / an ou -8,5% / an si MT). Dans ces projets de recherche, les budgets des émissions de GES doivent être prioritairement affectés aux jeunes chercheurs et chercheuses ;

- De mettre en place un budget carbone sur tous les secteurs du spatial scientifique (dès 2026, ≈ CT) avec la même trajectoire de réduction que l'ensemble des émissions de GES. Ce budget carbone doit être défini pour

tous les projets spatiaux et de R&T sur la base des ACV qui auront été menées, conformément à la trajectoire définie. Il doit être respecté lors du déroulement du projet et décliné sur l'ensemble des acteurs. Il doit être traité de la même manière que les budgets financiers ;

- D'accompagner par tous les moyens possibles les infrastructures sol à réduire leurs émissions de GES (CT) en suivant la même trajectoire. Notamment, il faudra conduire des audits des infrastructures sols les plus prioritaires, selon leur consommation énergétique au regard de leur volume afin de déceler celles qui sont les plus énergivores et les accompagner pour réduire leur consommation énergétique (électricité, chauffage, ventilation et climatisation) sur le MT ;
- De systématiser les exigences environnementales (incluses éventuellement dans les critères RSE) dans les spécifications pour toutes les parties prenantes, notamment à court terme dans les Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP) et demander à moyen terme une quantification de l'impact environnemental de l'activité associée.

3.3 SENSIBILISER ET FORMER A LA TRANSITION ENVIRONNEMENTALE

La transition environnementale doit être accompagnée par une sensibilisation et une formation de tous les utilisateurs, toutes les utilisatrices, de tous les acteurs et de toutes les actrices du spatial scientifique. Cela inclut :

- De sensibiliser et former (CT) le personnel CNES, les scientifiques dans les laboratoires, incluant les jeunes chercheurs et chercheuses, et équipes projets, quel que soit leur statut (contractuel ou titulaire) ;
- De former en continu (CT) à l'écoconception spécifiquement les acteurs impliqués dans le développement des projets (missions spatiales et projets de R&T, incluant les aspects hardware et software) ;
- D'accompagner les industries (MT) qui contribuent aux activités du spatial scientifique afin qu'elles puissent répondre aux nouvelles exigences environnementales du secteur.

3.4 OPTIMISER ET MUTUALISER LES BESOINS ET LES MOYENS

L'une des approches pour réduire les émissions de GES est d'optimiser les besoins et les moyens. Cela passe par de nombreuses actions, notamment :

- De limiter les sur-spécifications (CT) qui entraînent des développements inopportuns par rapport au réel besoin ;
- D'appliquer l'écoconception, à toutes les activités (CT) depuis les projets R&T jusqu'aux activités de développement, de réalisation et d'exploitation de missions spatiales ;
- De favoriser au maximum le recyclage, le réemploi, et la mutualisation des ressources utilisées (CT) pour les projets de R&T et la conception des missions spatiales sur toute leur durée de vie ;
- D'ouvrir les demandes APR ainsi que les sujets de doctorat et post-doctorat à l'exploitation de données d'archives (y compris hors missions européennes, CT) ;
- D'utiliser des critères de sélection des candidates et des candidats aux bourses doctorales et post-doctorales qui soient compatibles avec la transition environnementale (CT), a minima de ne pas pénaliser celles et ceux qui ont fait, par exemple, le choix de limiter les déplacements aériens, ou encore de s'engager dans une démarche de « slow-science » ;
- D'éviter les déplacements en avion non impérieux et de les remplacer par des déplacements en train ou une participation en distanciel (CT) ;
- De mettre en place une charte des événements éco-responsables co-financés par le CNES (CT) ;
- De favoriser les développements et intégrer les solutions low-tech (MT) ;
- D'encourager les missions ballons comme une alternative potentielle aux missions orbitales (MT), notamment pour les démonstrateurs technologiques ;
- De renforcer en amont les méthodologies et moyens nécessaires (MT) par exemple en finançant des projets de R&T visant à l'écoconception des missions spatiales, aussi bien d'un point de vue hardware que software.

Une autre approche consiste à mutualiser les ressources, et donc :

- De renforcer (CT) les efforts de mutualisation et de réutilisation des moyens sols de développement d'instruments spatiaux afin d'assurer une utilisation optimale de ces ressources énergivores. La mutualisation de ces moyens peut inclure le prêt de matériel entre laboratoires pour éviter les achats en duplication. Les équipes techniques de ces laboratoires doivent favoriser le recyclage, le réemploi et la mutualisation des instruments et matériaux utilisés ;
- De rationaliser le développement de nouvelles infrastructures à l'échelle locale ou régionale (MT). Les moyens existants doivent être partagés avant d'envisager de nouveaux moyens dont l'impact énergétique et environnemental est important. C'est le cas par exemple pour la formation des étudiants aux techniques spatiales (comme les centres spatiaux universitaires), dans les régions où ce type d'infrastructures existe déjà.

3.5 PRIORISER LES BESOINS POUR RÉDUIRE LES MOYENS

L'optimisation des programmes spatiaux, via l'écoconception par exemple, devrait permettre d'atteindre une réduction des émissions de GES de 20% environ (selon J. Knödlseider et D. Barret)¹³. Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, il sera indispensable de réduire la quantité de nouvelles missions spatiales. Ainsi, nous recommandons :

- De sélectionner (dès le CT) seulement les nouveaux programmes qui sont compatibles avec la trajectoire carbone globale. Il est important de profiler les émissions de GES par projet dans le temps et vérifier que la somme des émissions de GES du spatial scientifique soit compatible avec cette trajectoire. Ces nouveaux programmes doivent s'inscrire dans la feuille de route des grandes priorités scientifiques déterminées lors de cet exercice de prospective scientifique. La sélection de ces missions doit se faire au regard de leurs retombées scientifiques attendues, en favorisant peu de missions de grandes envergures plutôt qu'une multitude de petites missions. Elles devront également être conçues pour avoir

une durée d'exploitation la plus longue possible et impliquer de larges communautés scientifiques ;

- De renforcer (CT) les projets de R&T qui s'inscrivent dans les 3 axes suivants :
 1. Réduire l'impact environnemental (GES et ressources) de la conception des projets ;
 2. Augmenter la durée de vie des projets, éventuellement via des missions robotiques de service ;
 3. Améliorer les capacités technologiques en prévision des futures missions scientifiques ;
- D'ouvrir complètement l'accès aux données et aux logiciels (à CT) et financer des ressources humaines pour assurer pleinement l'exploitation scientifique des missions actuelles et passées et pour éviter leur duplication.

4 PENSER L'AVENIR

4.1 NÉCESSITÉ ET DIFFICULTÉ

Dans le paragraphe précédent, nous avons identifié des pistes pour réduire l'empreinte carbone des missions spatiales. Cependant, il est apparu clairement au cours de ce travail de prospective que cette approche seule, sans stratégie globale, ne permettra pas d'atteindre les objectifs nationaux et internationaux.

C'est donc un changement de paradigme bien plus profond qu'il faut initier. Pour cela, un travail de projection est inévitable pour tout nouvel engagement de long terme sur des missions. Le statut du spatial scientifique en 2050 ne dépend pas uniquement du monde scientifique mais de l'évolution de l'ensemble de la société, ce qui dépasse le cadre de cette prospective. Pour tenter d'initier tout de même ce travail impérieux et éclairer les orientations possibles, nous nous sommes appuyés sur les scénarios du rapport du GIEC (SR1.5) ensuite repris par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour proposer des trajectoires socio-économiques¹⁴. Pour chacune de ces trajectoires, nous avons proposé une situation du spatial scientifique à l'horizon 2050 et identifié les choix correspondants, à initier dès maintenant. Comme synthétisé ci-dessous, et du fait des

¹³https://indico.esa.int/event/349/attachments/3871/5477/Clean_Space_Webinar-EcoDesign_ESA.pdf.

¹⁴ <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/>

spécificités du secteur, il ressort que le chemin vers une réduction de l'empreinte environnementale du spatial scientifique est particulièrement ténu.

4.2 QUATRE SCENARIOS

Un premier scénario, le plus frugal, correspondrait à un monde qui s'oriente vers l'arrêt de la recherche scientifique dans le domaine spatial. Celui-ci se limiterait à s'assurer de l'avancée des engagements environnementaux des pays, la surveillance des quotas, et la protection de la nature, et se traduirait par un arrêt des missions ayant pour but principal de répondre à des questions scientifiques fondamentales. Cette approche s'oppose au besoin de connaissance dans un but désintéressé, qui doit rester la fin en soi du spatial scientifique, et au rôle d'éclaireur qu'a la recherche vis-à-vis du monde socio-économique.

A l'opposé, le spatial scientifique pourrait penser sa stratégie dans un scénario de type « pari réparateur ». Dans celui-ci, la recherche serait fortement développée au profit des nombreuses missions sélectionnées, comme par exemple vers la caractérisation d'astéroïdes pour l'exploitation de ressources minières extraterrestres, ou comme faire-valoir de l'exploration planétaire humaine. Cette stratégie est contraire aux valeurs éthiques de la recherche¹⁵, qui doit s'affranchir de tout opportunisme allant à l'encontre des enjeux environnementaux en cours. Et bien que la culture de l'échec soit parfois mise en avant, elle ne doit pas être appliquée ici, car nous n'avons pas le droit à l'erreur lorsqu'il s'agit des limites planétaires et de l'altération de la biosphère.

Ces constats extrêmes encouragent à explorer les scénarios intermédiaires, et tout d'abord celui basé sur les technologies vertes. Dans ce scénario, le spatial serait très développé et s'appuierait sur de multiples technologies bas carbone, et l'écoconception. Après avoir permis le développement du secteur privé, le spatial scientifique pourrait se reposer sur celui-ci pour obtenir des données. Cependant, les interviews menées nous indiquent que les pratiques en matière d'écoconception pour le spatial 'amèneraient une réduction des émissions

nettement insuffisante pour atteindre les objectifs dans les prochaines décennies.

Par conséquent, seul un chemin de crête peut conduire à un spatial scientifique pérenne. Cette voie ne sacrifie ni la science fondamentale, ni ne mystifie la connaissance technologique comme réponse unique aux enjeux environnementaux.

Nous recommandons de s'appuyer sur un scénario plus coopératif avec la mutualisation des projets et des moyens au niveau international associée à une diminution du nombre d'infrastructures au sol, l'utilisation généralisée de composants issus du recyclage et un rééquilibrage fort vers les ballons. Cela se transpose dans le choix de développer la recherche technologique principalement en ce sens, et de bannir la culture de la compétition dans les modes de financements et de gestion des projets.

De plus, le CNES se doit d'être moteur pour la mise en place d'une régulation spatiale internationale de l'accès à l'espace, pour les organismes publics comme privés. Ce levier devra conduire à préserver les orbites, tout en limitant les pollutions lumineuse et radioélectrique. Cette régulation entraînera également une réduction de la pollution stratosphérique des rentrées atmosphériques. Enfin, il est du ressort du CNES et ses partenaires européens d'optimiser la performance des lanceurs, afin de réduire leurs impacts sur l'environnement et améliorer leur efficacité et fiabilité.

4.3 UNE STRATÉGIE POUR LE SPATIAL SCIENTIFIQUE

Ce chemin se traduit par :

- Assumer ses responsabilités vis à vis de la société. Cela signifie la formation et l'information de tous les publics (général, étudiant, politique, industriel, etc.) et en transparence, non seulement des apports mais aussi des risques en particulier environnementaux du spatial, ainsi que la transmission de la culture de la coopération. En parallèle, cela implique d'aller vers plus de représentativité dans les choix de politique scientifique pour ramener celle-ci sous les limites planétaires d'une part et au-dessus des fondations sociales d'autre part, en impliquant toute la diversité de la communauté des personnels des

¹⁵ Avis 2022-43 du COMETS du CNRS.

laboratoires de recherche dans une démarche de type « Convention »¹⁶ ;

- Endosser sa place de pionnier dans la filière. La communauté scientifique française étant précurseur dans sa capacité à s'organiser autour de ces questions¹⁷, il est de la responsabilité des acteurs (français) du spatial de s'appuyer sur celle-ci pour engager le grand virage de bord de l'ensemble du secteur vers la sobriété, à l'opposé de la trajectoire actuelle. Le spatial scientifique, bien qu'étant une composante mineure du spatial, semble être l'acteur le plus à même d'amorcer un changement et d'influencer la filière, du fait de son expertise sur la thématique, de son degré d'auto-détermination, et de sa responsabilité éthique. Cela inclut la recherche d'un éclairage sur les entraves à cette transition écologique du spatial, par les sciences humaines et sociales, dans un effort interdisciplinaire. De plus, les activités scientifiques ne doivent en aucun cas être utilisées pour justifier de multiples autres activités spatiales, à forts impacts environnementaux¹⁸ ;
- Garder confiance en l'avenir. Pour ne pas hypothéquer aujourd'hui le futur du spatial scientifique, ni fermer la porte à des révolutions techniques, il est essentiel de programmer une trajectoire carbone contraignante pour l'ensemble du spatial scientifique, en accord avec la stratégie nationale bas carbone. Du fait des échelles de temps mises en jeu dans le spatial, il est nécessaire d'agir aujourd'hui sur les différentes temporalités. Cela signifie de définir et de mettre en place la trajectoire de réduction de l'empreinte environnementale des APR et de la R&T, de l'ensemble des infrastructures du spatial, de la globalité des activités scientifiques spatiales, dont les missions. La sélection de celles-ci doit permettre d'assurer leur retour scientifique optimal en en donnant la responsabilité à l'ensemble des scientifiques des communautés concernées, incluant les plus jeunes.

Soulignons que les éléments précédents concernent uniquement la problématique de

l'atténuation. Nous préconisons donc d'inclure les questions de résilience dans la réflexion globale du secteur.

5 RECOMMANDATIONS

Ces nombreux aspects amènent à recommander aux décideurs, au CNES et à la communauté scientifique :

1. De quantifier annuellement les émissions de GES de l'ensemble du spatial scientifique français ;
2. De se fixer une trajectoire de réduction globale de ces émissions avec un objectif de 7% par an, soit 30% entre 2025 et 2030 ;
3. D'honorer la trajectoire de réduction de ces émissions : mise en place de budgets carbone pour les émissions émanant de l'ensemble des parties prenantes ;
4. De définir et de sélectionner les missions, orienter la R&D, dans les limites de cette trajectoire ;
5. De sensibiliser et de former l'ensemble des parties prenantes (depuis les industriels jusqu'aux utilisateurs) à la transition environnementale ;
6. D'optimiser l'existant : augmenter la durée d'exploitation des missions, maximiser l'utilisation des données scientifiques, mutualiser et limiter les infrastructures sol, intégrer le réemploi, le recyclage et l'écoconception ;
7. De privilégier la coopération, de partager les données et de réduire la compétition ;
8. De placer les questions environnementales au cœur de la politique spatiale scientifique (notamment assumer ses responsabilités vis à vis de la société, endosser sa place de pionnier dans la filière et garder confiance en l'avenir) et d'anticiper le besoin de résilience.

Les recommandations susmentionnées sont présentées par thème, sans préjuger d'une éventuelle priorisation (temporelle, faisabilité ou efficacité).

6 CONCLUSION

Nous partageons tous et toutes la volonté de pérenniser l'activité scientifique spatiale française pour les générations actuelles et futures. Nous proposons donc une feuille de

¹⁶ Telle que l'a mise en place l'Institut de Recherche pour le Développement ou l'Assemblée de la transition de l'université de Lausanne.

¹⁷ Par exemple, Labos 1point5, prospective de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU).

¹⁸ Avis 2023-45 du COMETS du CNRS.

route ambitieuse qui répond aux enjeux environnementaux et sociétaux, qui s'appuie sur une amélioration de notre efficacité et sur une politique de sobriété, tout en garantissant l'absence de transfert de charge et d'effet rebond.

L'absence de régulation environnementale dans ce secteur en forte croissance, notamment avec l'émergence du NewSpace, impose une approche de réduction ambitieuse pour le spatial scientifique, accompagnée de recommandations concrètes balisant ainsi pour tous, la direction à suivre pour offrir un avenir viable.

En effet, nos projets s'inscrivent dans le temps long, nos décisions aujourd'hui ne doivent pas se concrétiser par des réalisations non acceptables et non soutenables demain. Elles doivent faire partie d'une démarche vertueuse, pertinente, et pérenne.

De plus, pour que la communauté scientifique conserve sa crédibilité, le spatial scientifique doit prendre toute sa part dans l'effort sociétal de réduction de l'empreinte environnementale, de façon responsable et en toute transparence. De même, la science ne doit pas servir de caution à des initiatives désastreuses du point de vue environnemental.

Nous faisons face à des méconnaissances actuelles qui méritent de porter les efforts sur des travaux académiques afin de répondre à des questions fondamentales. Ces questions concernent à la fois les impacts physiques du spatial sur l'environnement, et aussi les bénéfices sociétaux des missions spatiales. Ce dernier sujet doit être abordé, débattu et tranché, afin de disposer, pour les missions décidées, de la balance bénéfices sociétaux versus coûts environnementaux la plus favorable.

On pourrait craindre que de telles mesures entraînent une perte de compétences dans une course à l'international qui s'accélère. En réalité celles-ci augmentent la résilience du spatial scientifique et assurent la continuité de l'activité dans une société bas carbone, sur le très long terme.

Nous avons donc l'opportunité unique de faire du spatial scientifique français un modèle, précurseur, face à des enjeux environnementaux, et donc sociétaux, urgents et majeurs qui nous obligent à titre individuel, comme collectif.