

## SECTION 30

---

# SURFACE CONTINENTALE ET INTERFACES

### Composition de la section

Patricia BONIN (présidente de section); Éric FERRAGE (secrétaire scientifique); Doris BARBONI; Audrey BEAUSSART; Cédric BRACHET; Odile BRUNEEL; François CHABAUX; Benoit COURNOYER; Florence DONNADIEU-BERNARD; Catherine FERNANDEZ; Clémentine FRITSCH; Stephan HATTENSCHWILER; Françoise IMMEL; Lionel JARLAN; Joëlle LERAY; Anne LORRAIN; Jean-Michel MARTINEZ; Florian MERMILOT-BLONDIN; Julien PETILLON; Caroline PIERRE; Séverin PISTRE; Jeroen SONKE.

### Résumé

Dans le contexte actuel qui est celui d'une crise environnementale sans précédent liée aux changements globaux (climatiques mais aussi d'usage, activité anthropique) dont la société a pris conscience, les recherches dans le domaine de l'environnement sont devenues cruciales. La section 30 rassemble les chercheurs et chercheuses dont les thématiques de recherche portent sur le fonctionnement des surfaces et interfaces continentales. La section est par essence interdisciplinaire. Les chercheurs et chercheuses relèvent de très nombreuses disciplines, et les combinent pour comprendre le fonctionnement de cette zone critique à différentes échelles d'espace et de temps. Le rapport souligne les forces en présence au sein de la section et dans les candidatures au CNRS demandant le rattachement à cette section, décrit les points forts de la

communauté CNRS mais également les points d'amélioration en termes de champs thématiques couverts. La participation de la section 30 au travail de la prospective CNRS Terre & Univers – SIC doit compléter cette analyse conjoncturelle.

---

### Introduction

---

Le rapport de conjoncture de la section 30 du CNRS a été élaboré à partir des évaluations des chercheurs, des structures de recherche, des travaux des jurys d'admissibilité, et d'une enquête auprès des directeurs d'unités affiliées à cette section. Il reflète les activités de la communauté scientifique dans un contexte de crise

environnementale exacerbée par les changements climatiques et les activités anthropiques. La société, consciente de ces enjeux, exprime un besoin de compréhension mais aussi de recherche des solutions pour maîtriser la dégradation des écosystèmes, enrayer l'érosion de la biodiversité, assurer la sécurité alimentaire et opérer une transition énergétique. Il est essentiel de soutenir la recherche fondamentale pour aborder ces défis complexes. Le paysage universitaire et des organismes nationaux a connu des mutations importantes :

**Création des PEPR** : les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) alignés sur les thématiques de la section 30 et sur les enjeux de transition écologique et de développement durable. Les PEPR notables incluent : FAIRCARBON : Neutralité carbone et restauration des ressources naturelles ; TRACCS : Transformation de la modélisation climatique pour les services climatiques ; OneWater : Préservation de l'eau ; SOLU-BIOD : Biodiversité et solutions fondées sur la nature ; Bridges : Gestion durable des ressources marines ; Risques (IRiMa) : Gestion intégrée des risques ; PREZODE : Prévention des maladies zoonotiques ; MIE : Maladies infectieuses émergentes ; FORESTT : Résilience des forêts ; RiOMar : Initiatives de recherche sur les environnements fluviaux et marins. Selon l'enquête, 90 % des unités sont impliquées dans au moins un PEPR.

**Instituts universitaires** : promotion de la recherche interdisciplinaire et structuration de la formation par la recherche à l'échelle universitaire. Ils répondent aux enjeux sociétaux et favorisent la collaboration entre diverses disciplines, permettant aux chercheurs de différents horizons de partager leurs connaissances et expériences.

**Chaires de professeur junior (CPJ)** : introduites par la loi de programmation pour la recherche, ces chaires offrent une nouvelle voie de recrutement pour les directeurs de recherche. Environ 60 % des UMR interrogées ont été associées comme laboratoires d'accueil potentiel pour des profils de CPJ.

Le contexte actuel exige un renforcement des efforts en recherche fondamentale pour aborder la complexité des crises environnementales. Les priorités incluent : 1. **Innovation en mesures et suivis** : développer des technologies pour des mesures précises et continues, nécessaires pour établir des états de référence robustes et des suivis à long terme. 2. **Approches expérimentales solides** : concevoir des expériences permettant de comprendre les processus complexes à l'œuvre dans les écosystèmes naturels. 3. **Consolidation des bases de données** : construire et maintenir des bases de données complètes et fiables, essentielles pour les modélisations et les analyses de grande échelle.

---

## I. Positionnement thématique de la section 30

---

La section 30 du CNRS réunit des chercheurs dont les travaux portent sur la compréhension et la prédiction des impacts des changements environnementaux, naturels et anthropiques, sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes et des hydrosystèmes continentaux (urbains, agrosystèmes, etc.), estuariens, lagunaires, côtiers et marins, à toutes les échelles de temps et d'espace. Ces activités visent à développer des recherches fondamentales disciplinaires et à soutenir l'interdisciplinarité pour répondre aux enjeux environnementaux dans le cadre du développement durable. Il est crucial que les différentes disciplines se nourrissent mutuellement pour progresser dans la compréhension et la prédiction des impacts des changements globaux sur le fonctionnement des écosystèmes, de la zone critique et des hydrosystèmes.

La section 30 se distingue par sa pluridisciplinarité, se rattachant aux instituts CNRS Terre & Univers et CNRS Écologie & Environnement. Les thématiques abordées incluent l'écologie fonctionnelle, la dynamique et le fonctionnement

des écosystèmes continentaux et littoraux/marins, la géochimie, la bio-géochimie, l'écologie microbienne, l'écotoxicologie, la paléo-écologie du quaternaire et les modélisations numériques. Ces domaines sont à l'interface des sciences de la Terre et des sciences de l'environnement, soulignant l'importance de l'interdisciplinarité pour comprendre et prédire les impacts des changements globaux.

La section 30 partage des objectifs communs avec plusieurs autres sections du Comité national de la recherche scientifique (CoNRS), notamment la section 18 (Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles), la section 19 (Système Terre : enveloppes superficielles), et la section 29 (Biodiversité, évolution et adaptations biologiques). Elle collabore également avec la section 16 (Chimie et vivant) pour l'étude du continuum biotique-abiotique et la section 7 (Sciences de l'information) pour le développement de capteurs. La section 30 rejoint les centres d'intérêt de plusieurs CID du CoNRS, avec des liens forts avec la CID 52 (Environnements sociétés : du savoir à l'action) et la CID 55 (Sciences et données), cette dernière étant particulièrement pertinente pour les approches multi-échelles, la complexité des modèles et la gestion des grandes masses de données d'observation.

Ainsi, la section 30 maintient sa vigilance pour préserver cette pluridisciplinarité essentielle à l'avancement des connaissances et à la prédiction des impacts environnementaux globaux sur les écosystèmes et la zone critique.

### Mots-clés de la section 30

- Écologie fonctionnelle, dynamique et fonctionnement des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbain et agrosystème), littoraux, côtiers et marins ;
- Écologie microbienne ;
- Paléoécologie et paléoenvironnements du Pléistocène à l'Anthropocène ;

- Écotoxicologie et écodynamique des contaminants ;
- Processus de la zone critique à toutes échelles d'espace et de temps : transferts et flux de matière et d'énergie, altération et érosion ;
- Géochimie, biogéochimie et physicochimie des surfaces et interfaces, cycles des éléments ;
- Hydrologie, hydrogéologie et géomorphologie ;
- Télédétection, géophysique et imagerie des processus de la surface et de la subsurface ;
- Restauration, mitigation et ingénierie écologique ;
- Indicateurs d'état, de processus et du fonctionnement des écosystèmes ;
- Aléas, vulnérabilités et risques environnementaux, ressources environnementales et durabilité ;
- Développement instrumental, nouveaux outils en réponse à des problématiques environnementales.

À partir des mots-clés identifiés (cf. liste ci-dessus), dix grands champs thématiques couverts par la section 30 ont été dessinés pour des facilités de rédaction. Il est clair qu'il existe de fortes interactions entre les différents champs thématiques et la plupart des travaux menés par les membres de la section ou les candidats relèvent de plusieurs d'entre eux. Les travaux de la section 30 sont fortement ancrés dans les sciences physiques, chimique et biologiques. Les chercheurs et chercheuses relèvent de très nombreuses disciplines et les combinent pour comprendre le fonctionnement de la zone critique à différentes échelles d'espace et de temps.

Les champs thématiques sont les suivants :

- T1 : Écologie fonctionnelle ;
- T2 : Dynamique de la zone critique et des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), littoraux, côtiers et marins ;

## Comité national de la recherche scientifique

---

- T3 : Cycles de la matière et des éléments, biogéochimie, physico-chimie et physique ;
- T4 : Processus de la zone critique et des écosystèmes : échanges, transferts latéraux et verticaux de matière et d'énergie au sein de la zone critique et des hydrosystèmes, hydrologie, hydrogéologie et géomorphologie ;
- T5 : Écologie microbienne ;
- T6 : Écotox/toxicologie environnementale et transfert de polluants ;
- T7 : Paléoécologie et paléoenvironnements – trajectoires passées des écosystèmes et réponses aux perturbations ;
- T8 : Ressources environnementales et durabilité ;
- T9 : Aléas, vulnérabilités et risques environnementaux, restauration, ingénierie écologique et indicateurs d'état ;
- T10 : Développement d'outils et de méthodes d'observation appliqués à des problématiques environnementales.

---

## II. Structures fédératives, structures d'observation et outils

---

Les chercheurs de la section 30 du CNRS pilotent ou participent à de nombreuses structures labellisées. Entre 2021 et 2024, la section a émis des avis sur 14 GDR et écoles thématiques, 10 zones atelier (ZA), 2 écotrons, 2 stations d'écologie expérimentale, et 12 observatoires des sciences de l'Univers (OSU) qui accueillent des services nationaux d'observation des surfaces et interfaces continentales (SNO SIC).

L'expérimentation sur les écosystèmes est cruciale pour comprendre, modéliser et prévoir leur fonctionnement face aux changements climatiques et anthropiques. Les

écotrons de Montpellier et de l'Île-de-France offrent des infrastructures pour des expérimentations complexes et contrôlées sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. **Les stations expérimentales de terrain**, membres du Réseau national des stations d'écologie expérimentale (RenSEE), combinent espaces expérimentaux innovants et plateformes analytiques proches. Le **Réseau géochimique et expérimental français** (RéGEF) avec ses sous-réseaux en bio-géochimie, géochimie élémentaire, microscopie et géochimie organique, stimule les savoir-faire instrumentaux au sein de la communauté SIC.

La section 30 a aussi fourni des analyses scientifiques des 14 **zones ateliers** (ZA). Ces ZA sont des zones géographiques, souvent à l'échelle régionale, ayant une certaine unité fonctionnelle (par exemple, une forêt, un fleuve, un massif de montagnes, une ville, une zone côtière, etc.). Les 14 ZA possèdent des dimensions et des périmètres scientifiques variés. Certaines sont très anciennes et très bien structurées, d'autres sont encore en construction. Ces infrastructures nationales explorent les trajectoires des socio-écosystèmes à l'échelle régionale *via* des approches interdisciplinaires et transdisciplinaires. Les entretiens réalisés en 2023 et 2024 avec les porteurs de ZA ont été très positifs, facilitant la compréhension des objectifs et du fonctionnement de chaque ZA. L'évaluation est complexe de par la diversité des structures et modes de fonctionnement, mais cette diversité permet d'aborder la complexité des socio-écosystèmes en stimulant les corecherches avec les acteurs locaux. Depuis 2020, l'IR-RZA collabore avec l'IR-OZCAR (observatoires de la zone critique) pour construire l'infrastructure européenne LTER (Long-Term Ecosystem Research).

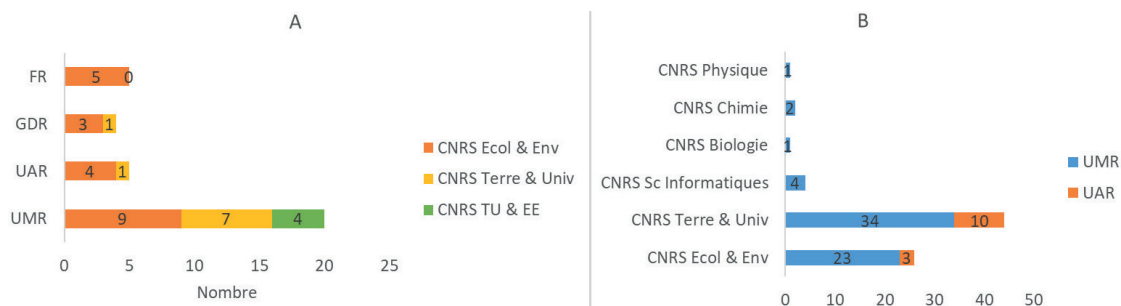
La section a également donné un avis sur l'association des OSU au CNRS. Les OSU, avec un statut d'école interne ou de grand établissement pour la formation, jouent un rôle crucial dans les observations à long terme des SNO. Ils fournissent aussi des services liés à l'informatique, l'archivage et la protection des données. Les échanges avec les directeurs d'OSU et

d'UMR ont mis en lumière des disparités de gouvernance et de fonctionnement entre les SNO, souvent dépendantes de l'implication des principaux porteurs. La gestion des données de site varie également beaucoup entre les OSU, bien que la mise en place des SNO ait fédéré les différentes communautés autour d'observatoires communs, renforcée depuis 2017 par la création des observatoires de la zone critique applications recherche (OZCAR). Ces structures jouent un rôle fédérateur pour la communauté SIC. Cependant, l'observation et le suivi des sites reposent souvent sur le personnel des UMR, dont beaucoup ne sont pas issus du corps des CNAP (le seul dont la mission d'observation est statutaire) ou du personnel ITA dédié. Cela garantit une forte implication des UMR dans le fonctionnement des services d'observation et contribue à leur succès scientifique. Toutefois, l'absence de reconnaissance statutaire des missions d'observation pour les chercheurs non-CNAP impliqués dans ces tâches peut devenir éprouvante et pénaliser leur carrière. À long terme, cela risque de réduire leur motivation et le sens de leur travail de suivi des données sur site.

### III. Structures et organisation de la recherche

En janvier 2024, 34 unités sont en rattachement à la section 30 comme section principale (cf. figure 1) dont 20 unités mixtes de recherche (9 et 7 pilotées respectivement par CNRS Écologie & Environnement ou par CNRS Terre & Univers et 4 copilotées par les deux instituts) et 5 UAR (unités d'appui et de recherche). Par ailleurs, 62 unités de recherche et 11 unités d'appui et de recherche sont en rattachement secondaire à la section 30. Le paysage est relativement stable avec seulement la création de 2 EMR (équipes mixtes de recherche) en 2023 et 2024.

La section 30 regroupe une communauté de 2 356 agents, dont 39% sont non permanents (cf. figure 2). Les chercheurs CNRS représentent 29% des effectifs et sont relativement stables avec 251 membres (avec 2 pour section secondaire), 21 sont également rattachés en CID 52. Ces personnels sont répartis dans 70 unités de recherche, avec une forte pluridisciplinarité. Environ 25% des chercheurs de la section 30 auront 57 ans ou plus dans les dix prochaines années. Les enseignants-chercheurs constituent 56% des effectifs, et l'IRD et l'IFREMER sont les principales tutelles des chercheurs non-CNRS. Le ratio ITA/chercheurs est de 0,6. Le maintien des personnels techniques en support est essentiel, ce sont les forces vives des laboratoires.



**Figure 1 :** Rattachement des unités de recherche à la section 30. A : rattachement principal ; B : rattachement secondaire.

Comité national de la recherche scientifique

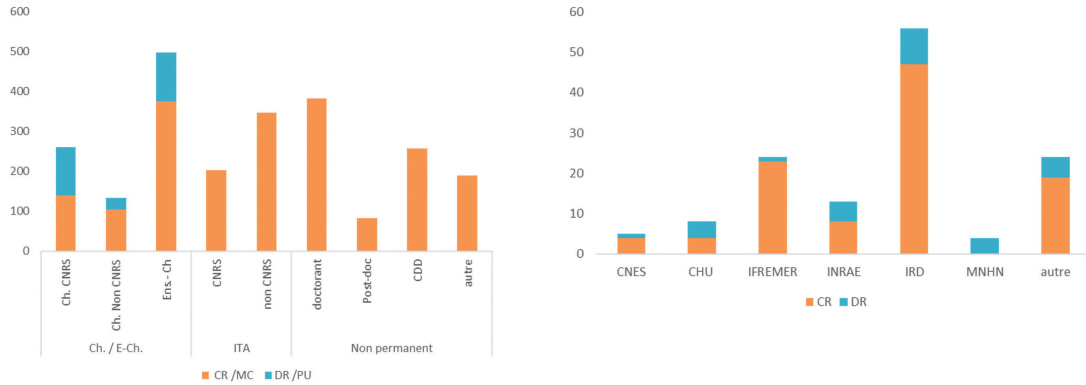


Figure 2 : Répartition des agents dans les unités rattachées à la section 30.

Ils permettent la réalisation d'expérimentations originales et sont essentiels au rayonnement de nos laboratoires. Le soutien d'organes structurant peut-être une voie efficace pour y parvenir. Il convient toutefois de veiller à ce que les personnels dédiés restent en lien étroit avec les UMR.

Les CRCN, DR2 et DR1 représentent respectivement 50 %, 26 % et 16 % des chercheurs et chercheuses (cf. figure 3). Les femmes représentent respectivement 44% des CR, et 25 % des DR2. La section se préoccupe fortement de ce déséquilibre qui doit être modéré par une analyse par classe d'âge (cf. figure 4). Pour les CRCN âgés de 30 à 39 ans, la parité est presque parfaite avec 54% de femmes. Au-delà de 40 ans, le déséquilibre homme-femme persiste mais ne s'aggrave pas, suggérant un biais systémique au recrutement plutôt qu'un hasard des promotions. Ce biais s'accroît au passage CR-DR, où la proportion de femmes DR est toujours inférieure à celle des hommes DR. Excepté pour la tranche 50-54 ans, la proportion des femmes ne dépasse jamais 30% pour les autres tranches d'âge. Cette variation pourrait résulter de la composition des sections ou de candidatures plus tardives des femmes. En moyenne, les femmes sont promues DR deux ans plus tard que les hommes.

La ventilation des chercheurs et chercheuses de la section 30 par thématique de recherche est présentée dans la figure 5. Cette répartition a été établie selon les déclarations

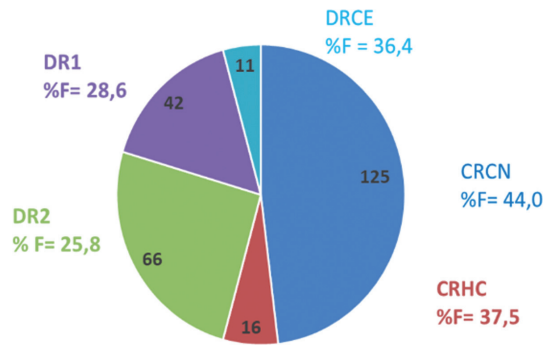
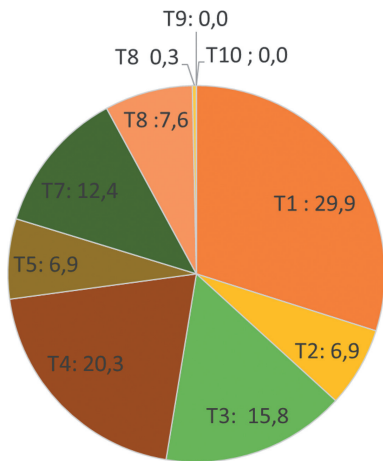


Figure 3 : Répartition des chercheurs et chercheuses de la section 30 selon leur grade.



Figure 4 : Pyramide des âges réparties par genre et par grade en 2023.

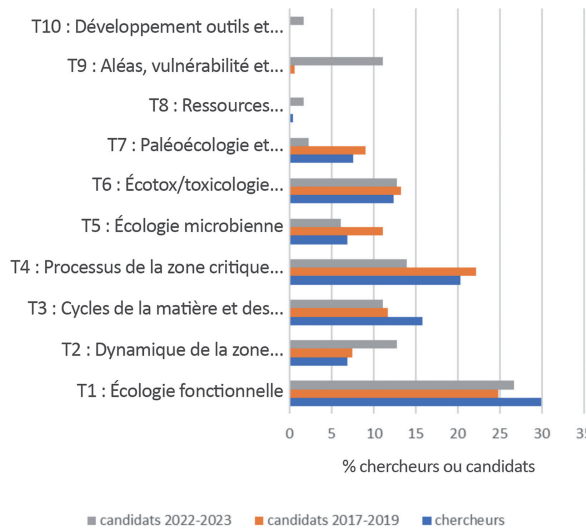
des chercheurs et chercheuses dans leur CRAC (compte rendu annuel d'activité) et ne présente que la thématique principale de rattachement. Cependant l'activité de la plupart relève clairement de plusieurs thématiques.



**Figure 5 :** Ventilation des chercheurs et chercheuses de la section 30 par thématique principale selon leur déclaration dans le compte rendu annuel d'activité (CRAC). Ces chiffres ne donnent qu'un aperçu global car la plupart des chercheurs et chercheuses ont des profils plurithématiques. Ce point sera pris en compte dans l'analyse plus fine des recherches menées au regard de chacune des thématiques.

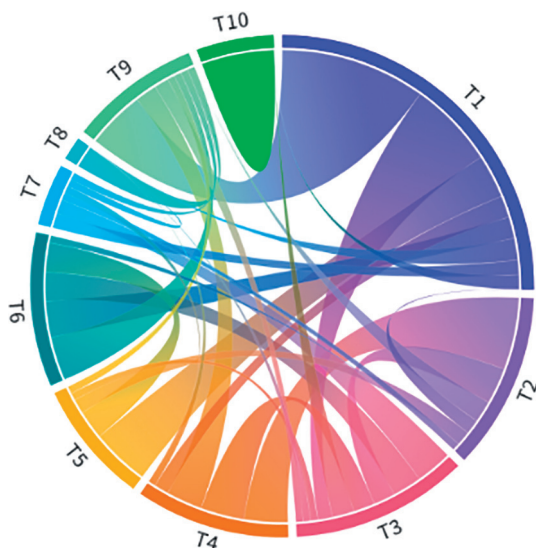
Les thématiques regroupant le plus de chercheurs et chercheuses sont les T1 (30%) et T4 (20%). Les thématiques T3 et T6 représentent quant à elles respectivement 16 et 12% des effectifs. Les thématiques T7 et T5 montrent chacune environ 7% des effectifs. Les thématiques T8, T9, ou T10 ne sont jamais déclarées en tant que thématiques principales par les chercheurs et chercheuses en poste alors que ces thématiques sont clairement ciblées par les candidats au concours (cf. figure 6). Si les pourcentages des effectifs semblent assez stables sur la plupart des thématiques, nous pouvons noter un recul des candidatures sur les thématiques T4 et T7 au profit des thématiques T8, T9 ou T10 (cf. figure 6).

Il existe une très forte interdisciplinarité comme illustré dans la figure 7. Plus de 80% des candidatures peuvent être rattachées à deux thématiques. La T1 est la plus représentée et présente des liens avec toutes les thématiques : 35% avec la T9 et 23% avec la T3. Les thématiques T2 et T4 sont très liées et ce de façon bidirectionnelle entre les thématiques principales et secondaires. Outre des liens évidents avec l'écologie fonctionnelle, la thématique T5 présente des liens fréquents avec la thématique T6. De même, cette dernière est



**Figure 6 :** Ventilation des chercheurs et chercheuses en poste et des candidatures selon les thématiques de recherche annoncées en thématique principale. 291 chercheurs et chercheuses, 180 candidats sur la période 2017-2019; 189 candidats entre 2022-2023.

## Comité national de la recherche scientifique



**Figure 7 :** Cooccurrence entre les thématiques identifiées selon la thématique principale et secondaire par les rapporteurs sur l'ensemble des candidatures 2022-2023. La taille attribuée à chaque thématique sur le cercle externe est proportionnelle au nombre de candidatures affichant cette thématique en position principale.

très fréquemment associée à la thématique T9, qui apparaît dans plus de 10 % de l'ensemble des candidatures en tant que thématique secondaire.

Le nombre de candidatures au concours CRCN est stable depuis 2019, avec une moyenne de 94 candidatures pour 5 postes, soit une pression de 18,8. L'âge médian des candidats est de 34 ans (entre 27 et 53 ans), avec une expérience de recherche médiane de 7 ans après la thèse. En moyenne, 30 % des candidats sont auditionnés et environ 15 % de ces derniers sont admis (âge médian : 33 ans, compris entre 28 et 38 ans ; médiane de 5 ans de recherche après la thèse). Sur les concours 2022 et 2023, 9 CRCN ont été recrutés, dont 5 femmes et 4 hommes. La réalisation d'un post-doc à l'étranger est encouragée mais non obligatoire, et les critères de bibliométrie ne sont pas les seuls utilisés pour les classements. Les candidats doivent valoriser leur propre recherche et éviter les signatures de complaisance. La section privilégie des critères qualitatifs, tels que l'impact et l'échelle d'influence des travaux (<https://sfdora.org/resource/rethinking-research-assessment->

building-blocks-for-impact/), l'originalité du parcours et du projet, ainsi que l'adéquation avec les thématiques de la section.

Le recrutement de personnels permanents à un stade précoce est un atout international, permettant aux équipes de s'engager dans des projets à long terme et les inciter à entreprendre des projets plus originaux, plus risqués et à plus fort impact. La section met l'accent sur la valeur ajoutée intellectuelle des lauréats, la qualité et l'originalité de leur parcours et projet, ainsi que leur autonomie dans la publication et le financement de la recherche. La qualité des présentations orales et des réponses aux questions lors des auditions est également évaluée.

Entre 2020 et 2023, 31 candidats ont été classés, avec une bonne répartition entre les laboratoires pilotés par CNRS Écologie & Environnement (16 lauréats) et CNRS Terre & Univers (15 lauréats). La fusion CR2-CR1 a entraîné un accroissement du nombre de candidatures plus avancées dans leur carrière sans augmentation de l'âge des candidats recrutés, avec une moyenne d'âge de 34 ans et une production scientifique similaire à celle des CR2 de 2017.

Pour le concours de directeur de recherche (DR), en 2022, la section 30 a reçu 41 candidatures et 37 candidats ont été admis à concourir. En 2023, 35 candidatures ont été reçues, avec 21 candidats admis à poursuivre les auditions. La section a apprécié la possibilité de présélection, permettant de passer plus de temps avec les candidats auditionnés. La sélection pour les DR se base sur plusieurs critères, tels que l'évolution thématique, le développement technologique, la mobilité géographique, la contribution aux avancées scientifiques, et l'adéquation avec les thématiques de la section. L'encadrement scientifique, la capacité à animer des projets de recherche, et la direction d'équipes ou de plateformes sont également pris en compte. Une réflexion a également été menée sur les traits qualitatifs permettant de mesurer l'investissement et la charge de travail des candidats, en accordant une importance particulière aux responsabilités collectives et leur positionnement dans la grille DORA. Cependant, il reste un déficit de



candidatures féminines. Des efforts sont nécessaires pour encourager les femmes à prendre des responsabilités valorisantes dans les laboratoires et à les afficher.

---

## IV. Évolution des thématiques et recrutements

---

### T1 : Écologie fonctionnelle

#### Mots-clés

Biodiversité, interaction biotiques, cycles des éléments, réseaux trophiques, succession, flux d'énergie, fonctionnement des écosystèmes, changements globaux, analyse de traits, omiques.

#### 1. Enjeux et problématiques scientifiques

L'écologie fonctionnelle progresse rapidement grâce à l'intégration de nouvelles technologies, à l'évolution des méthodes analytiques et à une meilleure compréhension des processus écologiques fondamentaux. Ces avancées contribuent à améliorer notre capacité à prédire et à gérer les effets des changements environnementaux sur les communautés, les écosystèmes et les services écosystémiques qu'ils fournissent.

#### 2. État de l'art : forces et avancées

L'écologie fonctionnelle évolue rapidement, intégrant plusieurs tendances et avancées récentes :

**Intégration des approches multi-échelles** : les chercheurs utilisent des données et méthodes de diverses échelles spatiales et temporelles, incluant l'utilisation de données à haute résolution spatiale, telles l'imagerie

satellite et la modélisation pour comprendre les processus écologiques à grande échelle. Ces approches permettent de mieux saisir les interactions trophiques et les processus écosystémiques à différentes échelles.

**Approches métaboliques et énergétiques** : l'étude des flux d'énergie et de matière dans les écosystèmes est centrale. Des techniques comme la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN) mesurent les flux métaboliques, et les modèles énergétiques prédisent les effets des perturbations sur les écosystèmes.

**Biologie des traits** : cette approche examine les interactions entre les organismes et leur environnement *via* les traits fonctionnels des espèces (taille du corps, longévité, stratégie de reproduction, traits morphologiques, physiologiques et comportementaux). Les traits chimiques, analysés par métabolomique (métabolome, volatilome), sont aussi étudiés pour comprendre les réponses des organismes aux changements environnementaux.

**Services écosystémiques** : l'écologie fonctionnelle s'intéresse aux bénéfices que les écosystèmes fournissent aux humains, comme la régulation du climat, la pollinisation, la purification de l'eau et la régulation des ravageurs. Les chercheurs explorent comment les processus écologiques influencent ces services et l'impact des perturbations environnementales sur leur qualité et disponibilité.

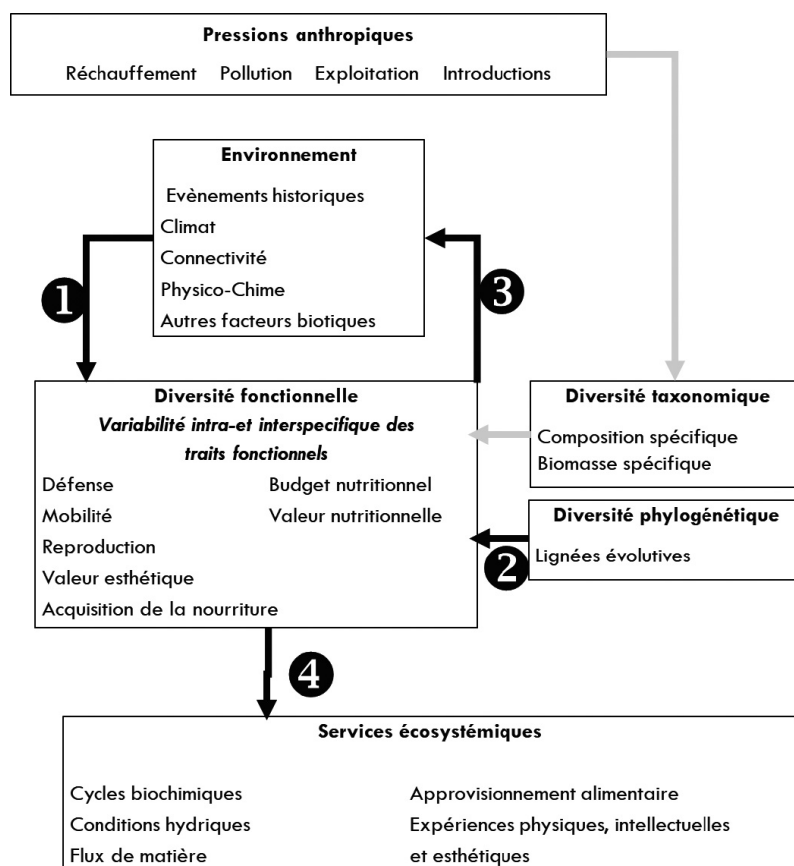
**Gestion et conservation des écosystèmes** : les informations sur les processus écologiques clés et les interactions entre les organismes et leur environnement sont essentielles pour développer des stratégies de gestion et de conservation. Les chercheurs élaborent des principes écologiques pour restaurer les écosystèmes dégradés, prévenir la perte de biodiversité et maintenir les services écosystémiques essentiels.

Ces tendances montrent une interdisciplinarité croissante et une application des découvertes scientifiques à la gestion et à la conservation des écosystèmes pour répondre aux défis environnementaux actuels. Les

## Comité national de la recherche scientifique

rétroactions dans les écosystèmes sont complexes, influencées par les changements environnementaux (climat, biodiversité, pollution, exploitation des ressources). Comprendre ces interactions nécessite des approches intégrées, examinant les couplages entre les différents compartiments des écosystèmes à diverses échelles (physico-chimique, biologique, temporelle, spatiale). Les études actuelles se concentrent sur les relations interspécifiques, mais pour une compréhension plus complète,

il est nécessaire d'étudier la diversité intraspécifique au sein de plusieurs espèces en interaction, reflétant ainsi mieux les conditions naturelles. Cela permettra de mieux évaluer l'importance relative de cette diversité dans les interactions et coévolutions des espèces. Ces efforts intégrés, incluant des mesures *in situ*, *ex situ* et la modélisation, sont essentiels pour comprendre et anticiper les impacts des changements environnementaux sur la dynamique des écosystèmes.



**Figure 8 :** Approche fonctionnelle pour étudier les conséquences du changement global sur les services écosystémiques. Les perturbations anthropiques (flèches grises) modifient les milieux (par exemple, facteurs abiotiques, habitats) et la structure taxonomique des communautés (c'est-à-dire, composition et abondance des espèces). Évaluer la diversité fonctionnelle des assemblages d'espèces aide à comprendre comment l'environnement (y compris les héritages historiques) détermine la structure des communautés (flèche noire 1) et permet ainsi de prévoir les impacts des perturbations anthropiques. Évaluer les relations entre la diversité fonctionnelle et phylogénétique est nécessaire pour comprendre comment l'évolution a façonné la diversité des traits parmi les lignées actuelles (flèche noire 2). Évaluer la diversité fonctionnelle est également nécessaire pour comprendre comment les communautés affectent leur environnement (flèche noire 3) et fournissent des services écosystémiques aux populations humaines (flèche noire 4) (repris d'après Villéger *et al.* (2016). *Aquatic Science*).

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

L'écologie fonctionnelle, cadre conceptuel et méthodologique, vise à comprendre les interactions entre organismes et environnement en utilisant une description mécanistique des interactions. Elle aborde diverses problématiques comme les réponses des organismes aux changements planétaires, les déterminants de la structure des communautés, les interactions trophiques et les cycles d'éléments. Les modèles biologiques étudiés vont des procarotes aux vertébrés, couvrant tous les milieux (terrestre, eaux douces, marin, atmosphère) et utilisant une multitude d'outils et d'approches de disciplines variées (biologie, chimie, physique, mathématiques, statistiques, géologie, pédologie, sciences sociales). L'écologie fonctionnelle, en explorant les mécanismes organisationnels du vivant et les interactions avec l'environnement à des échelles différentes, de l'écophysiologie individuelle au fonctionnement des écosystèmes, possède une richesse et une force considérables mais aussi une faiblesse majeure. Sa vaste portée rend difficile la création d'une identité scientifique précise et visible, avec un risque de dispersion et de manque de cohésion thématique. Grâce à sa multidisciplinarité et à sa mobilisation de différentes approches et techniques, l'écologie fonctionnelle occupe une place charnière dans les sciences de l'environnement. Elle facilite les projets transdisciplinaires sur les conséquences des changements globaux sur le fonctionnement, la stabilité et la résilience des écosystèmes. En reliant les organismes vivants et leur environnement physique, les compétences en écologie fonctionnelle sont essentielles pour comprendre les effets du changement climatique, de l'effondrement de la biodiversité ou du changement d'usage des terres sur les écosystèmes et les services qu'ils rendent à la société humaine.

Au CNRS, la section 30 est la principale à alimenter le vivier de chercheurs en écologie fonctionnelle, avec parfois l'appui de la commission interdisciplinaire 52. Le faible taux de recrutement, accentué par les besoins croissants liés aux changements globaux, représente un risque majeur menaçant le

positionnement du CNRS malgré les collaborations existantes avec d'autres organismes de recherche et universités. L'intégration de différents outils, techniques et concepts est essentielle pour renforcer la pertinence et la visibilité de l'écologie fonctionnelle, mais elle est de plus en plus difficile à porter individuellement. Un travail collaboratif et une organisation collective de la recherche sont nécessaires pour renforcer la complémentarité disciplinaire et les compétences, malgré un système de recrutement souvent centré sur l'excellence individuelle plutôt que sur la complémentarité des compétences.

La séparation entre la science des données et l'acquisition de nouvelles données pose également un enjeu croissant. Les chercheurs travaillant sur des bases de données larges et ceux utilisant des approches expérimentales ou d'observation travaillent souvent à des niveaux de précision et des échelles spatiales différentes, publiant différemment et à des taux de production variés. Le financement de la recherche favorise la recherche fondée sur les bases de données, risquant de faire perdre des compétences en mesures de terrain ou expérimentations contrôlées, cruciales pour comprendre les mécanismes sous-jacents des interactions entre organismes et environnement, tant en milieu terrestre que marin.

Les observatoires hommes-milieux (OHM), les zones d'ateliers (ZA) et d'autres sites de terrain comme la station des Nouragues en Guyane ou les alpages volants au col du Lautaret, ainsi que les grands équipements permettant de contrôler des variables environnementales (CO<sub>2</sub>, précipitations, température) comme les sites instrumentés AnaEE de Puéchabon, de l'O3HP et les écotrons, représentent des outils puissants et des opportunités pour la recherche en écologie fonctionnelle. Pour en bénéficier pleinement, il est souhaitable de renforcer les collaborations *via* des programmes de recherche communs, notamment *via* les PEPR. Une meilleure participation dans les projets de recherche centrés sur les observatoires des sciences de l'univers (OSU) et les observatoires de la zone critique (OZCAR) pourrait également renforcer la

multidisciplinarité de l'écologie fonctionnelle et créer de nouvelles opportunités de projets innovants.

Les sciences participatives offrent également un fort potentiel en écologie fonctionnelle, permettant des recherches à des échelles spatiales plus larges et une meilleure intégration du monde de la recherche dans la société. Ces initiatives sont particulièrement pertinentes dans le contexte du changement planétaire avec ses répercussions socioéconomiques et sanitaires. Des initiatives existantes comme l'Observatoire des saisons (SOERE TEMPO), un réseau national d'observation de la phénologie des organismes, sont exemplaires et pourraient être multipliées sur d'autres thématiques en écologie fonctionnelle, nécessitant toutefois un effort de coordination considérable.

## **T2 : Dynamique de la zone critique et des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), littoraux, côtiers et marins**

### **Mots-clés**

Dynamique spatiale et temporelle, trajectoire, caractéristiques/propriétés de la zone critique/des écosystèmes, biosphère, biomes, paysages, continuums verticaux et horizontaux, forçages naturels et anthropiques, structuration et hétérogénéité spatiale des écosystèmes et de la zone critique.

### **1. Enjeux et problématiques scientifiques**

Les recherches sur la « dynamique de la zone critique (ZC) et des écosystèmes continentaux » visent à caractériser, comprendre et prédire l'évolution des systèmes terrestres, littoraux et marins, tant sous forçages naturels qu'anthropiques (par exemple, urbanisation,

zone industrialisée ou en friche, déforestation, agriculture, aménagements littoraux). L'objectif est de caractériser les propriétés physico-chimiques, quantifier les processus écologiques, et analyser les paramètres abiotiques et biotiques des systèmes sous divers forçages. La ZC, essentielle pour les services écosystémiques vitaux (eau, sol, air, production végétale et animale, biodiversité, cf. figure 9), est étudiée pour comprendre les connexions entre environnements terrestres, littoraux et marins. Ces connaissances sont cruciales pour prédire l'impact anthropique sur le continuum terrestre, et pour développer des solutions de mitigation des risques chimiques, biologiques et physiques. Elles soutiennent aussi des décisions politiques éclairées, et aident à identifier et anticiper les points de bascule sous forçage anthropique, contribuant à la protection des ressources, la conservation de la biodiversité et la préservation de la santé.

### **2. État de l'art : forces et avancées**

#### ***Dynamique de la zone critique et des écosystèmes continentaux, littoraux, côtiers et marins***

Les recherches sur la dynamique de la ZC et des écosystèmes continentaux, littoraux, côtiers et marins couvrent toutes les échelles spatiales et temporelles, en se concentrant sur les impacts récents et actuels des activités humaines comme l'urbanisation, la déforestation, l'agriculture et les aménagements littoraux (cf. figure 9).

Le concept de « zone critique » a été proposé en 2001 par le *National Research Council* aux États-Unis pour désigner la zone « entre le ciel, les roches et les eaux », où interagissent l'eau, les gaz et les minéraux, supportant un sol vivant. La ZC est une zone complexe et son étude a pendant longtemps été partagée entre de nombreuses disciplines, mais le concept de ZC a émergé pour répondre à l'hyperspécialisation disciplinaire et permettre une étude holistique des processus qui animent la surface de la Terre. Les interactions avec les communautés travaillant sur la ZC ont fait évoluer la

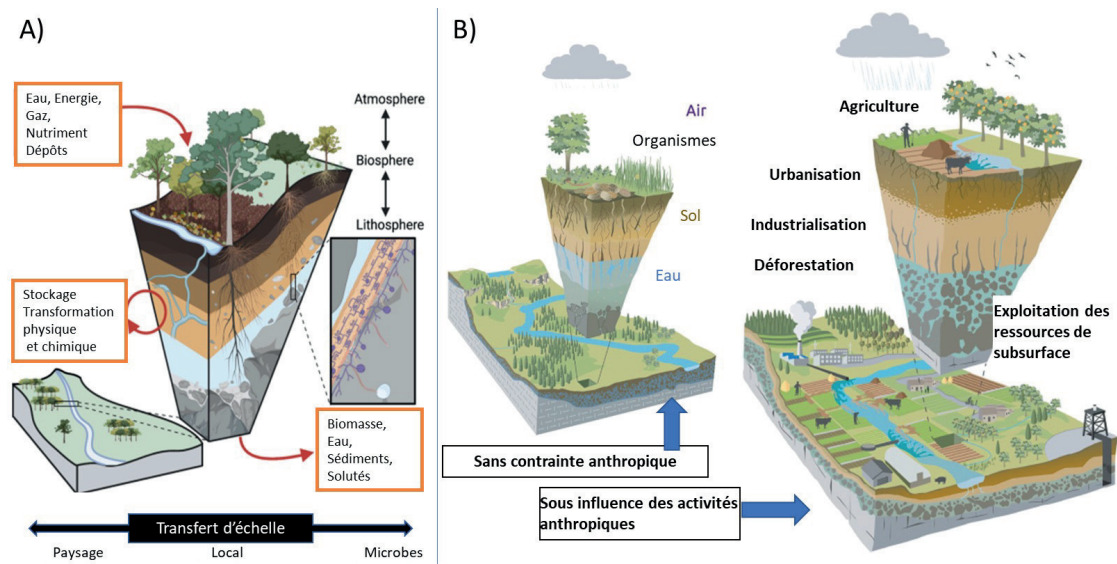
vision des écosystèmes, intégrant les dynamiques des continuums aquatiques (zones humides, rivières, estuaires, zones littorales, zones marines).

Les travaux en écologie fonctionnelle et paléoécologie, couplés aux études des processus de surface et de subsurface, ont conduit à des recherches sur les impacts anthropiques sur la structuration et l'hétérogénéité spatiale des systèmes continentaux et littoraux. L'artificialisation des sols et des paysages est un sujet clé où les approches holistiques permettent d'embrasser la complexité des dynamiques spatiales des flux biogéochimiques et de leurs conséquences écologiques, notamment les effets en cascade dans les continuums terrestres et aquatiques.

### ***Intégration des disciplines et renforcement des recherches***

L'intégration des processus de la ZC dans la compréhension du fonctionnement des écosystèmes est essentielle pour renforcer les liens entre les concepts écosystémiques et ceux de la ZC. Les efforts nationaux et internationaux pour créer des ponts entre les communautés de recherche permettent une meilleure intégration des recherches autour de ces thématiques. La section facilite cette intégration grâce à sa pluridisciplinarité et à ses structures de recherche (IR OZCAR et les structures d'observation (ZA, OHM) au sein de l'IR RZA), avec le programme national EC2CO.

Les observations à moyen et à long terme, essentielles pour la calibration des modèles et l'étude des trajectoires de la ZC, sont mises en œuvre sous l'égide de CNRS Terre & Univers et



**Figure 9** : Zone critique et surfaces paysagères : échelles spatiales et contraintes anthropiques.

A) La zone critique à des échelles emboîtées allant du paysage au microscopique. Les cadres représentent les apports, les cycles internes et les émissions entre la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. Les flèches rouges représentent les flux d'énergie et de matière.

Adapté de Kopp *et al.* (2023). *Perspectives : Critical zone perspectives for managing changing forests. Forest Ecology and Management*. 528 :120627. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120627>. \C 2022 Elsevier B.V.

B) Illustration des paysages et de la zone critique sans tenir compte de l'impact anthropique et sous influence des activités humaines dans des zones soumises à des forçages anthropiques. Les impacts de l'utilisation des sols sur la qualité de l'eau sont représentés par un assombrissement de la couleur de l'eau en aval.

Adapté de Naylor *et al.* (2023). *Achieving sustainable Earth futures in the Anthropocene by including local communities in critical zone science. Earth's Future*.

CNRS Écologie & Environnement. Ces observations doivent être soutenues et mutualisées, en intégrant les socio-écosystèmes pour nourrir les recherches dans ce domaine. Les recherches caractérisant les forçages « locaux » *versus* « globaux » et leurs résultantes aux différentes échelles spatiales permettent désormais de décliner à l'échelle locale voire régionale les effets des impacts globaux. Les transferts d'échelles et les collaborations avec des géographes et des chercheurs en SHS contribuent à améliorer la prédiction des phénomènes dynamiques grâce au développement des approches prédictives sur les socio-écosystèmes à l'échelle des territoires.

### **Écologie du paysage et interdisciplinarité**

Les travaux en écologie du paysage ont progressé sur les liens entre structure spatiale, biodiversité et fonctionnement, et les impacts anthropiques. Les recherches sur l'hétérogénéité spatiale des habitats et leurs fonctions dans divers contextes (par exemple, urbanisation, agriculture, paysages forestiers fragmentés) ont permis de mieux caractériser l'hétérogénéité temporelle des structures spatiales. L'intégration de nouvelles variables écopaysagères, comme la pollution lumineuse et sonore, l'émergence de l'écologie du paysage microbien, et le développement d'approches intégrant les structurations spatiales en 2D et 3D sont notables. Les liens entre les patrons spatiaux et la biodiversité, étudiés pour différentes composantes (par exemple, gènes, communautés, traits fonctionnels), sont mis en relation avec les propriétés fonctionnelles émergentes et les services écosystémiques, en faisant évoluer les approches autour de la multifonctionnalité.

Ces recherches s'appuient sur des concepts et outils issus de l'écologie, de la biologie, des géostatistiques et de la modélisation mathématique. Elles proposent des outils de diagnostic et de gestion, en partenariat avec des acteurs de la société. Une intégration croissante avec l'écologie de la santé, l'agroécologie, l'écologie de la restauration, l'ingénierie écologique, la biologie de la conservation, la gestion durable des écosystèmes naturels et l'aménagement territorial est observée.

### **3. Faiblesses, verrous et opportunités**

**Trajectoires de la zone critique et des écosystèmes** : les trajectoires de la ZC et des écosystèmes continentaux, estuariens et côtiers sont profondément influencées par les activités humaines, soulignant la nécessité d'inclure explicitement les paramètres sociétaux dans les recherches. Il est crucial de renforcer les synergies entre les différentes communautés de recherche en sciences et ingénierie de l'environnement (SIC) et de soutenir conjointement l'observation de la ZC et des écosystèmes pour préserver la biodiversité. L'intégration des impacts anthropiques, de l'observation et des modèles prédictifs, est essentielle pour comprendre et gérer les services écosystémiques le long du continuum terre-estuaire-littoral.

**Synergies et structuration des observations** : des bénéfices tangibles ont déjà été observés grâce au rapprochement des structures de pilotage des infrastructures de recherche (IR) d'observation à l'échelle locale et nationale. Ces efforts doivent se poursuivre, les structures s'enrichissant mutuellement des meilleures pratiques de gestion et d'évaluation. La création de l'infrastructure eLTER France offre une opportunité pour renforcer l'intégration de la communauté scientifique. Cependant, certains projets, comme les PEPR restent segmentés thématiquement ou territorialement. La labellisation des suivis à long terme du vivant par CNRS Écologie & Environnement doit être intégrée de manière opérationnelle avec les autres dispositifs, tandis que le programme national EC2CO devra continuer à jouer un rôle crucial dans la reconnaissance de cette communauté.

**Enjeux sur l'anthropisation et l'évolution des paysages** : l'anthropisation croissante des paysages et des traits de côte soulève des enjeux spécifiques liés à la modification des propriétés fonctionnelles des écosystèmes : diversité, connectivité, stabilité, résilience, successions écologiques, productivité, flux et propriétés culturelles. Les recherches doivent intégrer les forçages locaux et globaux, et leurs effets sur la dynamique des

écosystèmes interdépendants. Il reste encore des verrous à lever pour déconvoluer ces échelles et les intégrer davantage.

**Modèles d'étude et méso-échelles** : certains objets d'étude, comme les villes, les agro-systèmes et les systèmes vulnérables (montagne, zones humides, estuaires, littoraux), sont communs à plusieurs disciplines. D'autres milieux, comme les hautes latitudes et les littoraux, sont souvent étudiés sous un prisme spécifique, avec peu d'interfaçage. Les échelles spatiales intermédiaires (méso-échelles ou échelles paysagères) sont encore peu abordées dans les études des dynamiques des écosystèmes, contrairement aux travaux sur la ZC qui se concentrent majoritairement sur l'échelle du bassin versant.

**Approches opérationnelles et transferts conceptuels** : les recherches opérationnelles et les transferts conceptuels entre questions fondamentales et problématiques de gestion des écosystèmes, comme la restauration, la réhabilitation et la mitigation des risques, sont de plus en plus courants. Ces travaux, souvent à des échelles locales, s'étendent aux échelles territoriales grâce à des dispositifs tels que les zones ateliers (ZA) et les *living labs*. Le développement d'indicateurs d'état fiables et robustes sera crucial pour accompagner les mesures de remédiation.

**Avancées technologiques et big data** : les développements technologiques en télédétection, lidar, drones, traitement du signal, modélisation spatiale et simulation offrent des bases solides pour suivre les dynamiques de la ZC et des écosystèmes continentaux. Bien que le recul temporel soit encore limité, les interactions croissantes avec les recherches sur les paléoenvironnements peuvent améliorer cette situation. La modélisation en 2D et 3D permet d'affiner la résolution des modèles, d'intégrer les processus latéraux et verticaux, et de cartographier et modéliser les dynamiques spatiales. Ces modèles sont également des outils pertinents pour la société et les décideurs.

**Sciences participatives et nouvelles compétences** : le développement des sciences participatives représente une évolution

majeure, nécessitant de nouvelles compétences pour analyser et traiter des données de nature différente. Des collaborations interdisciplinaires, notamment avec les sciences humaines et sociales (SHS), seront essentielles pour transformer les données citoyennes en données scientifiques exploitables. De nouveaux outils statistiques, des méthodes de standardisation et l'utilisation de capteurs automatiques seront nécessaires pour garantir la fiabilité et la répétabilité des données.

Les recherches sur la ZC et les écosystèmes doivent continuer à intégrer les paramètres sociétaux et à renforcer les synergies entre les communautés de recherche. Les développements technologiques et méthodologiques, combinés à une meilleure structuration des observations et à l'intégration des sciences participatives, sont essentiels pour comprendre et gérer les impacts anthropiques sur ces systèmes complexes. La création de structures comme eLTER France et le soutien continu à des programmes comme EC2CO sont cruciaux pour construire une communauté scientifique forte et intégrée, capable de relever les défis liés aux changements globaux.

### **T3 : Cycles de la matière et des éléments, biogéochimie, physico-chimie et physique**

#### **Mots-clés**

Biogéochimie, physico-chimie, géochimie, altération, dynamique des contaminants, changements d'échelles, (bio-) interfaces, interdisciplinarité, interactions biotique-abiotique, hétérogénéité multi-échelle.

#### **1. Enjeux et problématiques scientifiques**

Les chercheurs et chercheuses de la section 30 ont une visibilité importante au niveau national et international dans les domaines de la biogéochimie des sols, des eaux, des

environnements anthropisés, et de la physico-chimie des interfaces organiques et minérales. Les activités scientifiques dans les domaines d'intérêt émergents tel que la biogéochimie et l'écodynamique des micro-/nanoplastiques, des contaminants métalliques stratégiques associés à la transition écologique, la dynamique de la matière organique et colloïdale des sols et des eaux, et le suivi des pollutions aquatiques et atmosphériques (métaux, gaz à effet de serre, etc.), se positionnent bien au niveau international ainsi que les développements en modélisation numérique et analytique des processus physico-chimiques sous-jacents à ces domaines importants.

## 2. État de l'art : forces et avancées

Des avancées importantes ont été faites dans le couplage des modèles de surface avec les modèles atmosphériques pour une description plus fine des processus physiques et biogéochimiques en jeu, une meilleure représentation de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des échanges, et du couplage végétation/eau/carbone/éléments. Ce rapprochement SIC/OA vise à renforcer les approches biologiques, physiques et chimiques des processus et à représenter leurs interactions, et est critique dans de multiples milieux complexes tels que les milieux urbains, les mangroves et les surfaces des zones polaires.

Dans un contexte de transition énergétique, les interfaces (micro-)organismes-solution-minéraux sont aujourd'hui au cœur des questions de production d'énergie durable et renouvelable, aussi bien à travers le développement de biocarburants, biogaz et biopiles que pour la production de H<sub>2</sub> ou le stockage de CO<sub>2</sub>. Plus largement, les cycles biogéochimiques des éléments et métaux stratégiques peuvent couvrir également des approches intégrées du manteau terrestre à l'impact environnemental. On retrouve les interfaces (micro-)organismes-solution-minéraux et les problématiques évoquées dans des environnements très divers et à différentes échelles, aussi bien dans les stations d'épuration qui constituent un maillon clé pour la transition

énergétique que dans les mégapoles ou encore les estuaires impactés par l'extraction minière et potentiellement à terme par le stockage de H<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub>.

D'autre part, le cycle de l'eau, et des éléments nutritifs et des divers polluants transportés au sein des compartiments des SIC, sont fortement impactés par les activités humaines et sont associés à des processus physiques et biogéochimiques conduisant à une régulation des flux d'eau, de nutriments et de contaminants. Les territoires sont ainsi soumis à des contaminations multiples, anciennes ou émergentes, et au changement climatique. Les limites planétaires imposent de concilier dans le futur développement durable, préservation de la qualité des ressources (eau, sols, biodiversité, etc.), et santé humaine et celle des écosystèmes. Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années sur la compréhension et la prédiction du devenir des contaminants réglementés ainsi que sur leurs effets dans les compartiments principaux de la zone critique comme les sols et les eaux de surface.

## 3. Faiblesses, verrous et opportunités

Dans les prochaines années, les défis généraux concernent des questions scientifiques transverses, telles que les interactions entre crises environnementales et écosystèmes, la modélisation intégrée du système Terre pour l'étude des risques environnementaux, ou encore les interactions, le vivant inclus, entre cycles longs et cycles courts pour une gestion durable des ressources. En termes de lieux géographiques prioritaires, les chercheurs et chercheuses de la section 30 sont bien présents, par exemple, en milieux polaires et boréaux, zone intertropicale, environnements urbains, et sur les friches industrielles. Les zones d'étude sont souvent déclinées en milieux particuliers tels les sols (tourbières, karsts, pergélisol, etc.), la rhizosphère, les milieux aquatiques (eaux de surfaces ou souterraines), les interfaces sols/rivières, les mangroves, les récifs coralliens ou encore les zones estuariennes.



**Le décroissement entre ces compar-timents** localisés en zones discrètes, ainsi que l'intégration de ces sites particuliers dans les modèles globaux des cycles biogéochimiques restent des verrous majeurs. Une harmonisation des modèles (spatio-temporalités différentes, reconsidérer les maillages) est aussi à privilégier. Afin d'obtenir une vision la plus holistique possible du fonctionnement de la zone critique, il est nécessaire de dépasser les dogmes souvent établis à travers les prismes disciplinaires et d'agréger au maximum les différentes communautés travaillant autour des SIC. En ce sens, l'exploitation et la structuration des grands jeux de données pourraient passer par des connexions accrues avec les mathématiciens et statisticiens encore peu représentés parmi les chercheurs et chercheuses de la section 30. Il semble également nécessaire de développer des chaînages de modèles à base physique intégrant ceux dédiés aux processus de mobilisation, de transfert de matière et de dépôt qui seront à combiner avec de nouvelles approches d'apprentissage automatique. Cette hybridation devrait pouvoir augmenter la puissance et la sensibilité des modèles classiquement utilisés dans l'étude des SIC. *In fine*, l'intégration de modèles climatiques, incluant la simulation des événements extrêmes, et ceux issus des SHS, comme données d'entrée, permettra d'apprécier l'impact des changements globaux au sein des surfaces continentales et du continuum HTM.

**Les interfaces biotiques/abiotiques** sont cruciales pour le système de maintien de la vie, car elles purifient l'air, fournissent de l'eau potable et rendent les nutriments biodisponibles. Le double rattachement de la section 30 aux 2 instituts CNRS Écologie & Environnement/CNRS Terre & Univers est propice aux développements des thématiques autour des interfaces biotiques/abiotiques, bien représentées au sein de la section. Les efforts portent notamment sur la compréhension mécanistique du rôle du vivant dans les cycles biogéochimiques des éléments. Cependant, les recherches visant à relier les processus biologiques intervenant dans les cycles des éléments, les transferts de matière, les chemins réactionnels, les processus de mobilisation, et

l'impact du biote sur les flux globaux restent encore parcellaire. Un autre défi réside dans la compréhension de la diversité du vivant et fonctionnement des écosystèmes en faisant le lien entre biodiversité et fonctionnement global des écosystèmes (par exemple, cycles biogéochimiques, ressources), sous contraintes environnementales. La section 30 utilise pertinemment les outils d'observation et d'expérimentation macro-échelles en biogéochimie/physico-chimie (zone atelier, OHM, OSU, IR OZCAR, etc.) dans des démarches colocalisées avec la modélisation. La jonction avec les processus aux petites échelles examinés par modélisation/expérimentation, nécessitant le développement de chaînage de modèles, reste encore un défi.

#### **L'émergence de nouveaux contaminants et de nouvelles formes de pollution.**

La section 30 maintient une activité dynamique et en constante évolution autour de l'émergence de nouveaux contaminants (molécules pharmaceutiques, PFAS, micro-/nanoplastiques, etc.) et de nouvelles formes de pollution (pollution lumineuse, acoustique, etc.), que ça soit en termes de détection, caractérisation physico-chimique, ou leurs interactions avec les surfaces minérales, la matière organique et/ou le vivant. Relativement peu d'études portent sur les impacts de ces nouveaux polluants aux niveaux des différents compartiments de la zone critique et leurs implications dans les flux et cycles biogéochimiques. Le recyclage de ces éléments, les méthodes de mitigation de leurs impacts ou les stratégies de remédiation sont et seront au cœur des préoccupations de la section.

#### **Verrous technologiques sur l'instrumentation.**

En termes de méthodologies, l'utilisation et le développement en spectroscopie/microscopie, le recours à l'isotopie, aux analyses élémentaires et aux techniques omiques, ainsi que les couplages avec les approches numériques permettent d'alimenter la compréhension des mécanismes physiques, chimiques et biologiques au sein de la zone critique. Plusieurs verrous technologiques sur l'instrumentation, le calcul et la donnée ont été identifiés, et concernent l'utilisation des nano-satellites,

les nouveaux capteurs environnementaux (idéalement *low-cost*, et adapté aux milieux extrêmes), la convergence entre calculs et analyses de données à haut performances, les application IA *via* l'apprentissage automatique, et bien sur l'accès ouvert aux données scientifiques.

## **T4 : Processus la zone critique et des écosystèmes : échanges, transferts latéraux et verticaux de matière et d'énergie au sein de la zone critique et des hydrosystèmes, hydrologie, hydrogéologie et géomorphologie**

### **Mots-clés**

Cycle de l'eau, forçages climatiques et anthropiques, CO<sub>2</sub>, ressources hydriques, processus bio-physico-chimiques.

### **1. Enjeux et problématiques scientifiques**

La zone critique est fortement liée au cycle de l'eau avec ses composantes en subsurface et de surface et contrôle de très nombreux processus physiques, chimiques et biologiques. Elle concentre l'essentiel des enjeux sociétaux actuels et implique de travailler de manière interdisciplinaire. Ces nombreux processus sont étudiés par différents thèmes et nous aborderons ici plus spécifiquement les processus physiques liés au cycle de l'eau de surface et souterrain, l'altération et l'érosion des surfaces continentales. On observe que cette communauté s'est fortement structurée, avec succès, ces dernières années autour de l'infrastructure de recherche OZCAR qui a regroupé les communautés d'hydrogéologie et d'hydrologie. De nombreuses candidatures de jeunes chercheurs et chercheuses se basent sur ces

chantiers, les briques de base que sont les SNO, preuve du succès de cette structuration dans la communauté.

Le changement climatique, la montée du niveau des océans, l'anthropisation des milieux ou l'évolution de l'occupation des sols modifient très sensiblement les flux hydriques, thermiques, de solutés ou de CO<sub>2</sub> dans la zone critique. Ces évolutions ont un effet direct sur le bon état quantitatif et qualitatif des masses d'eau. Ainsi, il est nécessaire de disposer de données sur plusieurs cycles hydrologiques pour caractériser ces évolutions, identifier les processus et leurs interactions avant de proposer des modélisations. À ce titre, les SNO s'avèrent des outils particulièrement efficaces en produisant des bases de données robustes. La reproduction à l'aide de modèles numériques des évolutions observées face à des forçages climatiques et/ou anthropiques devient un enjeu majeur pour prévoir l'état des ressources hydriques de surface ou souterraines, aux échelles locales et régionales, à des horizons de 10 à 50 ans et ainsi contribuer aux politiques publiques pour la gestion des usages multiples (volumes d'eaux prélevables, état des milieux, risques sanitaires).

### **2. État de l'art : forces et avancées**

Les chercheurs et chercheuses de la section 30 se distinguent par leur expertise dans divers domaines liés à l'hydroclimatologie, l'érosion, le transport sédimentaire, et l'hydrogéologie. Regroupant 24 unités de recherche, une douzaine de chercheurs se concentrent sur l'hydroclimatologie en utilisant des outils satellitaires et de modélisation hydrologique (ORCHIDEE, ISBA). Ces outils leur permettent d'étudier le fonctionnement de grands bassins et d'agro-systèmes à l'échelle globale, d'évaluer l'impact du climat actuel, et de proposer des projections pour les scénarios climatiques futurs. Les données de télédétection et *in situ*, après analyses statistiques et assimilation, alimentent des modèles globaux de flux (eau, énergie, CO<sub>2</sub>). Ces approches, couvrant des zones arides, tropicales, de montagne, le bassin méditerranéen,

et les territoires polaires, mettent l'accent sur les interactions et rétroactions entre les processus influençant le cycle de l'eau et des éléments. Les résultats intéressent directement la gestion des ressources hydriques, l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la production hydroélectrique, et les événements extrêmes. L'ouverture vers la société inclut la perception de la variabilité climatique et hydrologique, ainsi que l'impact du climat sur les sociétés agraires au cours de l'Holocène.

Les processus d'érosion, d'altération et de transport sédimentaire sont étudiés à travers des approches combinant la collecte de données hydro-sédimentaires et géochimiques, le développement de modèles numériques, et l'utilisation croissante de techniques de télédétection locale (caméras, lidar, drones) et satellites. Les bilans des flux dissous et particuliers fluviaux permettent de comprendre les relations entre les processus d'érosion/altération et le contrôle climatique, ainsi que de suivre l'évolution des morphologies fluviales. Les traceurs isotopiques sont utilisés pour contraindre les dynamiques d'érosion et les processus de transport et de déposition dans les bassins versants. L'érosion est également étudiée en tant qu'aléa, avec le suivi des mouvements de terrain et du trait de côte en lien avec des événements hydrologiques et climatiques extrêmes.

En télédétection, certains chercheurs se concentrent sur l'humidité des sols et la dynamique des nappes, intégrant le volet souterrain du cycle de l'eau. Une douzaine de chercheurs se démarquent dans l'étude du transport réactif et multiphasique dans les roches poro-fracturées, abordé à l'échelle porale avec des techniques innovantes de physique, d'imagerie et de microfluidique. Ce groupe a montré une excellente dynamique et visibilité internationale, notamment grâce à des écoles d'été. Les modèles développés sont appliqués à la dépollution des sols et nappes, au stockage de CO<sub>2</sub>, et à la salinisation des aquifères côtiers.

Les techniques d'hydrogéophysique sont utilisées à toutes les échelles, avec la géodésie et la gravimétrie spatiale pour suivre la dynamique des réserves souterraines. Les modèles inverses intégrant les données de géophysique

(ERT, PS, résonance protonique, sismique, gravimétrie) sont développés pour mieux contraindre les modèles hydrogéologiques et les échanges sol-plantes en milieux hétérogènes. Un groupe de chercheurs cible les contaminants émergents, notamment les microparticules à l'interface sol-subsurface, avec un axe émergent sur le rôle des zones urbaines dans le cycle de l'eau, concrétisé par la labélisation du SNO-Observil en 2020.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

Les IR ont démontré leur importance pour la communauté et leur puissance à produire des données de qualité mais la contrepartie semble être une tendance au cloisonnement des approches ou des échelles de modélisation. Ainsi, l'intégration des résultats acquis à micro-échelle dans les modèles hydro(géo)logiques de méso-échelles restent à améliorer. Dans l'autre sens, la désagrégation depuis la macro-échelle avec l'estimation des incertitudes associées reste un enjeu scientifique important pour répondre aux enjeux sociétaux de gestion de l'eau à l'échelle des territoires. Pour les mêmes raisons, le lien entre domaine côtier et bassin versant devrait faire l'objet de recherches plus spécifiques eu égard aux enjeux socio-économiques à très court terme (diminution des flux sédimentaires fluviaux, érosion côtière, salinisation, submersion, etc.).

L'intégration de la part biotique des eaux continentales de surface ou souterraines représente aussi un axe qui reste certainement insuffisamment exploré. Le rôle des micro-organismes pourtant omniprésents demeure mal considéré dans les processus de contamination. Ces aspects sont essentiels pour aborder les possibilités de réutilisation d'eau traitées et l'ensemble des services écosystémiques des hydroécosystèmes.

Les recherches en hydrologie et hydrogéologie représentent un enjeu majeur pour répondre à de nombreuses questions liées à la transition écologique, aux stratégies d'adaptation au changement climatique et aux modifications de l'usage des ressources en eaux.

Malgré ces enjeux scientifiques et sociétaux associés à ce thème, on peut noter que la section enregistre relativement peu de dossiers de candidatures au concours CRCN. Il est possible que cela soit lié à un contexte favorisant d'autres voies d'insertion professionnelle pour les titulaires des diplômes de master ou de doctorat.

## T5 : Écologie microbienne

### Mots-clés

Microbiome, biodiversité, dynamiques spatio-temporelles des micro-organismes, fonctions écologiques, milieux naturels et anthropisés, hétérogénéité multi-échelle, interactions durables, interactions biotique-abiotique, forçages environnementaux, biogéochimie, impact des contaminants, changements d'échelles, services écosystémiques, changement climatique, holobionte, ré-ensauvagement, restauration, conservation, ingénierie du microbiome, interdisciplinarité.

### 1. Enjeux et problématiques scientifiques

L'écologie microbienne concerne l'étude des interactions entre les micro-organismes (archées, bactéries, champignons, protistes, virus) et leur environnement (biotique et abiotique). Elle est, par définition, interdisciplinaire. Elle examine, entre autres, comment les micro-organismes interagissent entre eux et avec d'autres organismes vivants et leur milieu physique. Elle explore la diversité génétique et fonctionnelle des micro-organismes, leur distribution géographique, leur adaptation aux différents habitats, et leur réponse aux changements environnementaux. Dans le périmètre de la section 30, comprendre les rôles écologiques des micro-organismes est crucial pour plusieurs domaines, notamment les sciences de l'environnement, de l'agriculture, de la santé globale et unique (*One Health*), la santé des écosystèmes, les biotechnologies et les sciences du climat. Les micro-organismes

jouent un rôle primordial dans le cycle des nutriments, les processus biogéochimiques, et contribuent à certains services écosystémiques essentiels pour la santé humaine et animale et la durabilité environnementale, par exemple, la décomposition des matières organiques (méthanisation, épuration des eaux usées), les associations bénéfiques avec les plantes augmentant leur productivité ou réduisant l'impact des phytopathogènes, leurs propriétés de dégradation de contaminants chimiques dont les hydrocarbures, certains produits chimiques industriels dont les microplastiques.

### 2. État de l'art : forces et avancées

Plusieurs concepts ont été proposés ces dernières années pour structurer l'écologie microbienne, notamment microbiome, bactériome, pathobiome, virulome, plasmidome, résistome, phycosphère, holobionte, et superorganisme. Ces concepts facilitent la compréhension et la communication des interactions microbiennes et de leurs fonctions écologiques. Par exemple, le microbiome et le superorganisme explorent les interactions entre espèces microbiennes, tandis que l'holobionte examine les relations entre un hôte et ses micro-organismes associés. Le pathobiome étudie les interactions microbiennes pathogènes. Ces notions sont enrichies par des processus écologiques comme la résistance, la résilience, la coalescence, la symbiose, le mutualisme, le commensalisme et le parasitisme, expliquant les dynamiques des communautés microbiennes.

L'écologie microbienne de la section 30 couvre divers environnements, des sols aux milieux aquatiques continentaux et marins, de l'atmosphère aux milieux extrêmes (chauds, froids, arides, acides, etc.), ainsi que les environnements urbains, miniers, arctiques, antarctiques, désertiques ou de haute altitude. Environ 15 % des chercheurs de la section (40 sur 250 dont 16 en thème principal) se consacrent à l'écologie microbienne, avec 30 candidatures reçues en 2022 et 2023. Les recherches s'appuient sur les avancées en

écologie moléculaire et omiques, comme les approches méta-codes-barres ADN et métagénomiques, permettant de révéler la diversité génétique et les potentiels fonctionnels des communautés microbiennes sans culture préalable. Ces techniques incluent le séquençage massif d'amplicons PCR ou d'ADN microbien environnemental (métagénomique), souvent complété par des études des ARN (métatranscriptomique), des protéines (méta-protéomique) et des métabolites (méta-métabolomique) pour analyser les réponses fonctionnelles des micro-organismes aux changements environnementaux. L'utilisation d'isotopes stables (SIP) et de marquages bio-orthogonaux d'acides aminés non canoniques permet d'identifier les populations microbiennes actives, facilitant ainsi l'étude de la dynamique des micro-organismes et de leurs interactions écologiques.

Les chercheurs de la section 30 en écologie microbienne se concentrent sur plusieurs domaines, notamment le rôle des micro-organismes hétérotrophes dans les flux de matières organiques, souvent résumés par le concept de « boucle microbienne ». Ces micro-organismes agissent comme des décomposeurs, ce qui est essentiel pour l'équilibre des écosystèmes aquatiques *via* la décomposition de la matière organique allochtone, principale source de carbone et de nutriments. Les chercheurs s'intéressent aussi à la stœchiométrie écologique des éléments chimiques, comme les cycles biogéochimiques de l'azote, du soufre et du phosphore, régulant la disponibilité des nutriments et influençant la composition chimique de l'environnement. Ils explorent également les dynamiques des microbiotes humains, animaux, et des sols agricoles, ainsi que les milieux urbains et aquatiques, dans une perspective de « santé unique ». Ils étudient les dynamiques de coalescence des communautés microbiennes selon les sources d'émission ou d'apports exogènes, et l'impact des pressions sélectives comme la présence de polluants, incluant micro- et nano-plastiques, sur ces dynamiques d'assemblage. Ces recherches mettent en évidence l'importance des émissions de formes microbiennes allochtones sur la biodiversité

des écosystèmes aquatiques et les assemblages microbiens des sols agricoles et urbains.

Les travaux sur les systèmes lacustres et littoraux mettent en lumière l'écologie du phyto- et zooplancton, ainsi que l'impact des changements globaux sur ces organismes et leurs interactions avec d'autres composants des écosystèmes, comme les bactéries, virus et champignons microscopiques. L'impact de la dissémination d'agents pathogènes sur la structuration et le fonctionnement des communautés microbiennes des sols agricoles, milieux urbains et aquatiques est également étudié. La capacité de colonisation et la persistance des agents pathogènes dans ces milieux sont analysées *via* leurs interactions avec les micro-eucaryotes. Les recherches s'étendent également à la structure et au fonctionnement des réseaux trophiques dans les écosystèmes littoraux, les sols, l'interface sol-plante et le continuum continent-océan. Les chercheurs étudient les effets des micro-organismes sur les flux de matière organique, la dynamique du carbone du sol, et la réduction des nitrates dans les sédiments et sols. La dynamique des contaminants dans les milieux naturels et anthropisés est également un domaine d'étude clé, visant à comprendre, tracer et prédire le transport et la transformation de ces polluants et leurs incidences sur divers organismes. Les chercheurs de la section 30 se penchent aussi sur l'écologie des gènes de résistance aux antibiotiques, étudiés le long du continuum émetteurs (par exemple, les rejets de stations d'épuration) et milieux récepteurs (comme les rivières). Ils examinent l'échange horizontal de gènes par les micro-organismes, incluant les îlots génomiques et les régions de plasticité génomique, pour comprendre l'écologie et les apports fonctionnels de ces génomes accessoires.

Les études des holobiontes se multiplient, mettant en lumière les interactions complexes entre les hôtes (plantes, animaux, insectes) et leurs micro-organismes associés. Ces recherches montrent comment les holobiontes influencent les écosystèmes et les cycles biogéochimiques. Par exemple, les partenaires microbiens dans les tissus des polypes

coralliens jouent un rôle crucial contre les agents pathogènes et pour l'accès aux nutriments. De même, les holobiontes végétaux sont étudiés pour leur structuration, leur évolution en fonction des conditions du milieu, et leurs rôles dans la protection et la croissance des plantes. Ces recherches ont conduit à des initiatives d'ingénierie écologique visant à améliorer les relations hôte-microbiome et leurs bénéfices *via* la manipulation du microbiome, incluant des approches pro- ou prébiotiques. Enfin, des études portent sur les micro-organismes comme bio-indicateurs de la qualité écologique du milieu et explorent des technologies innovantes et écoresponsables, telles que l'ingénierie microbienne et la bioremédiation. Ils cherchent à comprendre la réponse microbienne au changement climatique en utilisant des paléoarchives microbiennes pour prédire les réponses futures aux événements climatiques.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

L'écologie microbienne fait face à de nombreux défis, notamment **la complexité des interactions entre les micro-organismes et leur environnement**, ainsi que la difficulté d'observation à des échelles microscopiques. Les avancées technologiques en génomique ont permis d'étudier la structure des communautés microbiennes avec une résolution sans précédent, révélant une biodiversité jusqu'alors ignorée. L'objectif actuel est de dépasser la simple description taxonomique de cette biodiversité pour mieux comprendre sa fonctionnalité, en développant des modèles quantitatifs basés sur les données méta-omiques afin de saisir l'écologie des microbiomes et leur évolution face aux défis de la santé planétaire.

L'étude *in situ* de la **biodiversité fonctionnelle** des micro-organismes est cruciale pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes, mais elle est entravée par la diversité incroyable de micro-organismes encore non identifiés et non cultivés. Beaucoup de gènes microbiens ont des fonctions encore mal définies et difficiles à prédire à partir de leurs séquences génomiques. Pour relever ces

défis, les chercheurs doivent améliorer les techniques de culture et de fouille des données méta-omiques pour mieux comprendre les rôles fonctionnels des communautés microbiennes en réponse aux variations environnementales. **L'isolement en culture pure** de certaines bactéries est souvent impossible en raison de leur dépendance à des interactions avec d'autres micro-organismes. Un défi majeur consiste donc à développer des approches culturelles à l'échelle d'assemblages simplifiés mais représentatifs des communautés naturelles pour explorer leurs rôles fonctionnels. Des analyses fonctionnelles à haut débit seront nécessaires pour ces études.

Un autre défi est la détection et la caractérisation des micro-organismes présents en faibles abondances dans l'environnement, qui peuvent jouer des rôles « **clé de voûte** » importants dans le fonctionnement des écosystèmes. La perte de ces micro-organismes pourrait entraîner la perte de fonctions écologiques critiques. Pour mieux apprécier cette diversité cachée, les chercheurs utilisent des approches de séquençage unicellulaire combinées à des méthodes de marquage fluorescent et de tri cellulaire, ainsi que des analyses bio-informatiques avancées.

Un défi majeur pour les années à venir est d'intégrer ces recherches en écologie microbienne dans des études collaboratives regroupant divers experts pour développer une modélisation intégrée et prédictive à différentes échelles. Ces travaux doivent s'appuyer sur de grands ensembles de **données méta-omiques** et bénéficier des avantages computationnels de l'intelligence artificielle. Cela permettrait une meilleure compréhension des effets des changements globaux sur la résistance et la résilience des microbiomes, y compris l'activation de formes dormantes essentielles à certaines fonctions écologiques. Pour comprendre l'hétérogénéité temporelle et spatiale des microbiomes, les approches d'observation doivent être complétées par des études en systèmes contrôlés, permettant d'apprécier les modifications des communautés microbiennes face à des forçages environnementaux spécifiques. Les échanges entre systèmes contrôlés et sites naturels (ZA, SNO) sont essentiels pour vérifier la pertinence

des modèles prédictifs développés. Relier de grands ensembles de données de différentes disciplines (géochimie, écologie, sociologie, etc.) dans le cadre d'analyses biomathématiques des corrélations entre jeux de données d'observation pourrait ouvrir la voie à une meilleure compréhension des dynamiques spatio-temporelles au sein des compartiments microbiens. La modélisation des systèmes microbiens reste complexe en raison de l'interconnectivité des processus biogéochimiques et de la multiplicité des interactions entre micro-organismes.

Lever ces verrous et produire de nouvelles connaissances pourrait permettre de valoriser les micro-organismes et leurs communautés pour la production d'énergie renouvelable, de nouveaux médicaments, la dépollution et la restauration d'écosystèmes dégradés *via* un ré-ensauvagement microbien.

## T6 : Écotox/toxicologie environnementale et transfert de polluants

### Mots-clés

Transfert de contaminants, exposition aux pollutions, biodisponibilité, toxicocinétique-toxicodynamique, bioaccumulation, effets des pollutions sur le vivant et le fonctionnement des écosystèmes, persistance et dégradation/métabolisation des contaminants, réactions aux bio-interfaces, spéciation, toxicologie environnementale, remédiation, biosurveillance, contaminants émergents, effets cocktail/multistress/multirésistance, relation hôte-pathogène, holobionte, exposome.

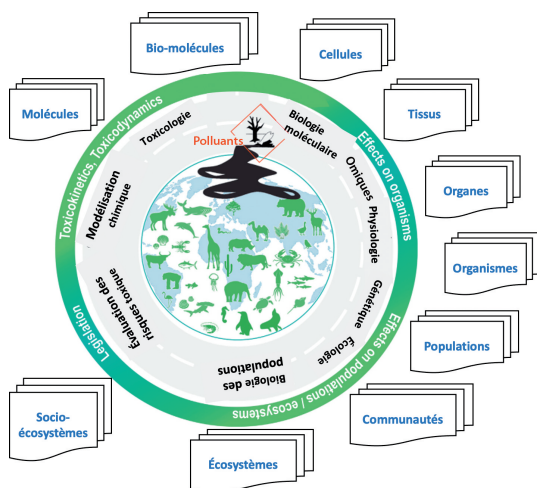
### 1. Enjeux et problématiques scientifiques

La pollution est désormais reconnue comme l'une des pressions entraînant l'érosion de la biodiversité et impactant le fonctionnement des écosystèmes, et comme un facteur déterminant vis-à-vis des enjeux de santé humaine. Les émissions de contaminants ont connu une

croissance exponentielle depuis le siècle dernier, tant en quantité qu'en diversité (composés inorganiques et organiques naturels et synthétiques). Les changements globaux affectent non seulement le fonctionnement des écosystèmes mais aussi l'écodynamique des contaminants (spéciation, transport, dégradation des contaminants). On note une augmentation notable des recherches en écotoxicologie au sein de la section 30. Malgré les efforts de la communauté, il existe encore des manques de connaissances pour parvenir à quantifier les impacts des contaminants sur le fonctionnement des écosystèmes, mieux comprendre les patrons spatiaux et prédire les trajectoires dans le temps.

### 2. État de l'art : forces et avancées

Les travaux menés par les scientifiques de la section 30 concernent le devenir et l'écodynamique des contaminants et s'intéressent aux réponses du vivant à différents niveaux d'organisation biologique (cf. figure 10). Les transferts



**Figure 10** : Niveaux d'organisation en écotoxicologie : étude du devenir dans l'environnement et des effets des produits chimiques toxiques sur le vivant, des molécules aux écosystèmes, au carrefour de plusieurs disciplines. Adapté de Gouveia *et al.* (2019). *Ecotoxicoproteomics : A decade of progress in our understanding of anthropogenic impact on the environment*. Journal of Proteomics 198, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2018.12.001>. Open access article under the CC BY-NC-ND license.

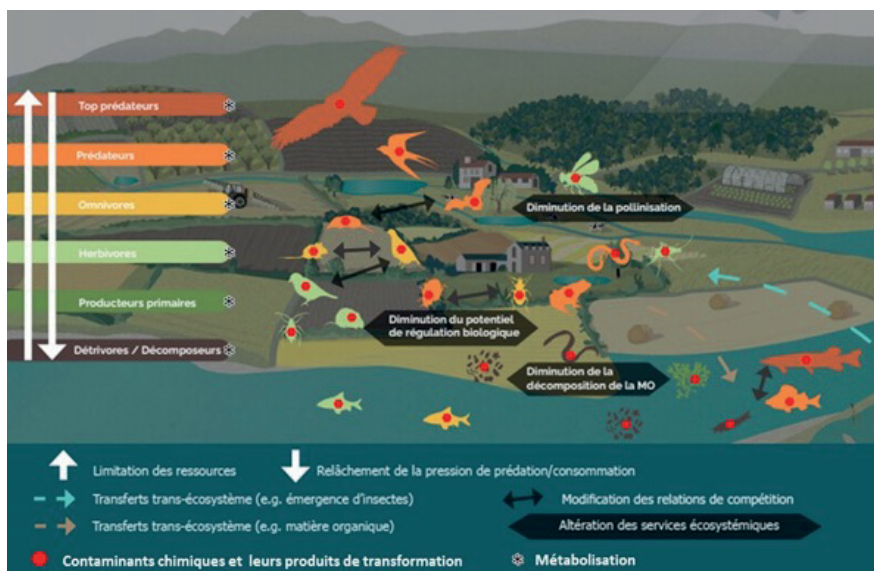
## Comité national de la recherche scientifique

de contaminants sont abordés dans les différents compartiments (eau, air, sol, ZC, biote). La caractérisation des sources et flux reste au cœur des travaux de la communauté, qui s'intéresse désormais à de nouveaux contextes de contamination émergeant avec les changements sociétaux et des milieux peu explorés.

Les travaux en écotoxicologie couvrent à la fois des contaminants chimiques historiques (métaux, polluants organiques persistants) et émergents (nanomatériaux, produits pharmaceutiques, cosmétiques, métaux de la transition énergétique, substances per- et polyfluoroalkylées). L'intérêt pour les plastiques, en particulier les microplastiques et nanoplastiques, et les pesticides actuellement utilisés est croissant. Les recherches incluent également les toxines naturelles (cyanotoxines, phycotoxines) et se concentrent sur les impacts dans les systèmes faisant face aux pollutions et aux facteurs de stress multiples, tels que les changements climatiques et les interactions entre contaminants biologiques et chimiques.

De nouvelles formes de pollution, telles que la pollution lumineuse, sonore, ou les

radiofréquences, commencent à être étudiées. Les études sur les contaminants biologiques et l'écologie de la santé sont principalement abordées sous l'angle de la microbiologie environnementale. Les thématiques de résistance, tolérance et résilience sont de plus en plus explorées, avec un intérêt croissant pour les effets sur le métabolisme énergétique, les régulations hormonales et l'immunotoxicité. Les recherches incluent les effets des expositions à faibles doses et chroniques, les effets cocktails et les effets reportés (*carry-over effects*). La communauté développe un cadre pour aborder les problématiques de multi-expositions et d'effets des mélanges, avec un rapprochement des recherches en santé humaine et en écotoxicologie grâce à l'approche *One Health*. Le transfert de contaminants et la propagation des impacts dans les réseaux trophiques, y compris ceux incluant l'humain, sont des sujets d'intérêt croissant, permettant une meilleure compréhension des mécanismes écologiques de réponse aux contaminants et du devenir des contaminants dans les écosystèmes (cf. figure 11).



**Figure 11** : Transferts et propagation des effets des contaminants chimiques dans les réseaux trophiques (cascades trophiques) : exemple des produits phytosanitaires. Issu et adapté des travaux de Laure Mamy (coord.) *et al.* (2022). *Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques*. Rapport d'ESCO, INRAE - Ifremer (France), 1408 pages - Chapitre 12. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur les réseaux trophiques.



Les scientifiques de la section explorent le rôle des micro-organismes dans la transformation des contaminants, la remédiation et l'impact des polluants sur les écosystèmes, en combinant approches mécanistiques et observation. Ils utilisent des méthodes intégrées : expérimentation contrôlée, suivi *in natura*, modélisation, surveillance environnementale et criblage (cf. figure 12).

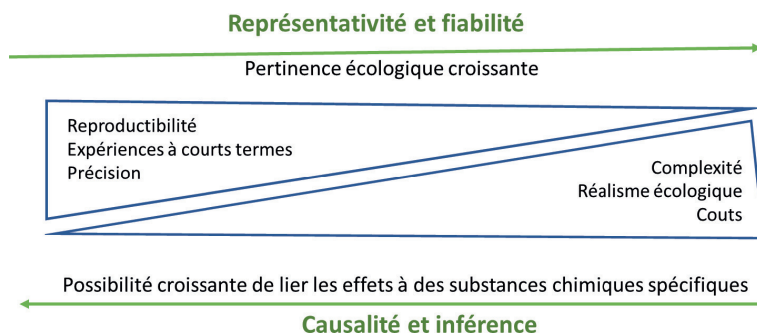
La communauté scientifique a réalisé des avancées significatives grâce à l'amélioration des procédures et outils analytiques pour la quantification et la caractérisation des contaminants chimiques *in vivo* et *ex vivo*. Les capteurs développés et des seuils de détection abaissés permettent d'analyser des matrices complexes. L'essor des analyses multi-résidus et non ciblées a enrichi la détection des contaminants chimiques. Les progrès instrumentaux ont approfondi la compréhension des mécanismes de dynamique, spéciation, disponibilité environnementale et biodisponibilité des contaminants. Les recherches, couvrant des échelles moléculaires à globales, ont renforcé les approches interdisciplinaires avec la physique, chimie, écologie, géographie et SHS. En collaboration avec des partenaires civils, entreprises et agences, des outils d'aide à la décision sont développés. Face aux préoccupations sociétales croissantes sur la qualité environnementale et la toxicologie, et l'évolution de la réglementation, il existe une demande accrue pour des données robustes. La communauté s'efforce de transférer ces connaissances à la société à travers le développement de capteurs,

biocapteurs, (bio-)indicateurs, biomarqueurs, démarches d'évaluation des risques.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

Les travaux en écotoxicologie sont intrinsèquement complexes, nécessitant un dialogue inter- et transdisciplinaire et des études à toutes les échelles. Malgré des efforts pour décroiser les concepts de diverses disciplines (santé humaine, animale et environnementale), des progrès sont encore nécessaires pour harmoniser la sémantique. Une volonté existe de combler le fossé entre les mécanismes à petite échelle et les approches holistiques à grande échelle. Les problématiques de transfert d'échelle nécessitent une réflexion sur les paradigmes et des interactions accrues avec les modélisateurs et le développement de l'IA. Les défis comprennent la déconvolution des impacts des différents stressors et leurs interactions sur les écosystèmes, intensifiés par l'anthropisation croissante.

**Changements d'échelle** : les recherches visant à généraliser et transcender les études centrées sur des modèles doivent être renforcées. La complexité des problématiques nécessite une combinaison d'expérimentation, de modélisation, de surveillance et d'observation. Ces outils transversaux permettent d'intégrer les impacts des changements globaux sur l'écodynamique des contaminants et leurs effets. Ils abordent également les questions écotoxicologiques dans les socio-écosystèmes, incluant les



**Figure 12** : Continuité et complémentarité des approches en conditions contrôlées et *in natura* en écotoxicologie. Adapté de Kraak & Roessink, *Community ecotoxicology*. (2021, January 18). <https://chem.libretexts.org/@go/page/294568>.

actions et rétroactions entre sociétés et pollutions. Lever ces freins améliorerait la compréhension des trajectoires spatiales et temporelles et affinerait les capacités de prédiction. Malgré les progrès en matière de disponibilité environnementale, biodisponibilité et bioaccessibilité, le manque d'interfaçage d'échelles reste présent, les communautés travaillant souvent en silo. Il est crucial de poursuivre les recherches sur ces aspects, en s'attachant aux échelles intermédiaires et en couplant chimie-toxicologie-écotoxicologie-écologie fonctionnelle. Les verrous liés aux changements d'échelle persistent également au niveau des niveaux d'organisation biologique, bien que la communauté tente d'opérer des liens entre ces niveaux, des gènes aux écosystèmes. Des cadres de travail, comme l'écotoxicologie du paysage, la méta-écotoxicologie, l'écotoxicologie trophique et comportementale, pourraient améliorer la compréhension des conséquences fonctionnelles des pollutions. Les efforts de recherche abordent rarement les services écosystémiques et la multifonctionnalité en lien avec les pollutions environnementales. Les outils omiques (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique) ont permis de développer des approches basées sur des marqueurs à différentes échelles biologiques, prometteuses pour étudier les liens et conséquences en cascades biologiques et fonctionnelles et pour le développement d'indicateurs (d'état, de fonctionnement, diagnostic d'état de santé). L'essor de ces méthodes représente un défi pour l'analyse, l'interprétation et l'archivage des données.

**Multistress et « effets cocktails »** : caractériser les conséquences écotoxicologiques dans un contexte de multistress (changements globaux, contaminations chimiques et biologiques) est une gageure. Ces interactions sont peu étudiées au-delà de 2 à 3 paramètres. La communauté s'approprie progressivement les cadres conceptuels d'écologie du stress et d'exposome. Les progrès en matière de méthodes d'échantillonnage et analytiques offrent des perspectives pour faire évoluer les travaux et renouveler les paradigmes vis-à-vis des coexpositions. Poursuivre les recherches à

l'échelle du continuum terre-mer et sur les flux trans-écosystèmes est prioritaire. Pour aborder les problématiques d'écodynamique, il est nécessaire de poursuivre les recherches sur des systèmes modèles pour embrasser les contaminations multiples et la diversité du vivant. Les évolutions réglementaires sur l'utilisation d'animaux à des fins expérimentales nécessitent des approches et méthodes conformes aux « 3Rs » (réduire, raffiner, remplacer). Les « NAMs » (méthodes non animales) et les réponses comportementales sont de plus en plus utilisées. Le développement de méthodes d'imagerie et d'analyses chimiques et biochimiques, basées sur des prélèvements non létaux, est crucial. Les approches de modélisation sont indispensables pour aborder l'exposition et les effets dans un contexte de stressseurs multiples et de coexposition.

**Cadre *One Health* et problématiques santé/écotoxicologie** : les interactions réciproques entre les concepts de santé (antibiorésistance) et les recherches sur les résistances aux contaminants se renforcent. Les travaux s'intéressent aux résistances croisées et aux coexpositions aux contaminants biologiques et chimiques. L'intérêt pour le pathobiome et le résistome au sein des populations et communautés est croissant. Cependant, les contaminants biologiques et les toxines naturelles sont moins étudiés que les contaminants chimiques. Les projets sur les interactions polluants/pathogènes ou parasites sont en émergence. De même, le rôle des micro-organismes et le concept d'holobionte sont de plus en plus abordés et l'étude des interactions tripartites contaminant-hôte-micro-organisme se développe. L'étude des liens environnement-santé est mise en avant par le cadre *One Health*, désormais approprié par la communauté.

**Défis en lien avec l'observation** : les liens entre exposition aux polluants, réponses du vivant et conséquences sur le fonctionnement sont complexes à étudier, les processus opérant à des échelles d'espace et de temps différentes et à des niveaux d'organisation biologique emboîtés. Aux larges et méso-échelles, les approches expérimentales sont souvent impraticables. Les approches de rétro-

observation en écotoxicologie émergent mais sont encore marginales. Les projets basés sur l'observation du vivant sont logiquement difficiles à mettre en œuvre et à valoriser. Pour tirer pleinement parti de ces recherches, il est nécessaire d'acquérir suffisamment de données temporelles et spatiales. Les suivis découlant de la Directive-cadre sur l'eau en sont un exemple. Les avancées en traitement et analyse de données et en modélisation offrent des opportunités pour développer ces approches basées sur l'observation, ainsi que les approches alliant un complément mécaniste, théorique ou expérimental. La communauté souhaite structurer la bancarisation d'échantillons, l'observation pérenne et renforcer l'appui sur la modélisation. « Systématiser » et « automatiser » l'observation écotoxicologique du vivant seront des chantiers majeurs à venir.

## **T7 : Paléoécologie et paléoenvironnements – trajectoires passées des écosystèmes et réponses aux perturbations**

### **Mots-clés**

Chrono-écologie, géochronologie, paléoenvironnements, paléoécologie.

### **1. Enjeux**

La thématique « *paléo* » est par essence à l'interface avec plusieurs sections du CoNRS (18, 19, 30, et 31), ce qui rend le positionnement des acteurs parfois délicat. Si le volet « Paléoenvironnements : archives océaniques, glaciaires et continentales » trouve sa place dans la section 19, les questions de paléoécologie sont davantage abordées par le biais des dynamiques des écosystèmes terrestres dans la section 30, avec des développements de bio-indicateurs fossiles et de biomarqueurs appliqués aux archives sédimentaires continentales

et côtières. Les paléontologues de la section 18 travaillant, quant à eux, aux échelles de temps géologiques, tandis que la section 30 focalise sur les échelles de temps quaternaires avec un focus plus spécifique sur l'Holocène. Pour des questions relevant des thématiques croisées « paléoécologie/paléoenvironnements » et « anthropisation des écosystèmes », la section 30 aborde davantage les questions d'ordre environnemental telles que l'évaluation de l'impact des hommes sur les paléo-paysages, la géomorphologie, l'accès aux ressources et leurs exploitations (biologiques ou minières) alors que la section 31 est focalisée sur les dynamiques d'occupation humaine.

### **2. État de l'art : forces et avancées**

La paléoécologie au sein de la section 30 se concentre principalement sur les changements de la couverture végétale (composition spécifique, diversité fonctionnelle, structuration, dynamiques), les régimes de feux (intensité, fréquence, types de perturbations), la datation des retraits glaciaires, les fluctuations de la calotte groenlandaise, et la quantification des paléo-précipitations et paléo-températures. Ces études visent à comprendre la stabilité des paysages et la réponse de la végétation aux changements climatiques abrupts. Les chercheurs de la section 30 s'intéressent à une grande variété d'écosystèmes, notamment tropicaux, sub-désertiques, méditerranéens et boréaux, situés dans des régions comme les Amériques, l'Afrique, Madagascar, l'Asie du Sud-Ouest, l'Europe, le domaine circumméditerranéen, le Proche-Orient, l'Eurasie, la Russie et le Canada. Les outils et indicateurs utilisés comprennent les pollens, poussières atmosphériques, micro-charbons, entomocénoses, cernes d'arbres, phytolithes, macro-restes, isotopes stables, biomarqueurs, isotopes de minéraux de transition et nucléides cosmogéniques. Ces indicateurs sont appliqués aux archives sédimentaires continentales, carottes de glace, moraines, dépôts fécaux, paléosols et contextes archéologiques.

L'impact de l'homme sur le long terme est central dans ces études, tout comme l'influence de l'environnement sur l'homme (par exemple, son régime alimentaire). Les indicateurs font l'objet de calibrations et d'analyses comparatives sur des écosystèmes actuels pour évaluer leur potentiel à produire des reconstructions quantifiées de variables environnementales. Les efforts récents ont porté sur l'amélioration des géochronomètres, la mesure du  $^{14}\text{C}$  sur molécules individuelles, la quantification de l'humidité atmosphérique relative, la température des feux, les paléotempératures, les paléoprécipitations, les taux d'érosion et la paléoaltimétrie.

La communauté paléoécologique de la section 30 a concentré ses efforts sur quatre domaines principaux : i) le développement et l'amélioration des méthodes et outils ; ii) la réalisation d'études de cas pour comprendre les interactions à long terme entre la dynamique de la végétation, le climat et les perturbations, avec des implications pour la gestion des écosystèmes et la conservation d'espèces et de zones refuges ; iii) la réalisation de synthèses à l'échelle continentale pour tester des concepts écologiques à partir de vastes ensembles de données paléoécologiques ; iv) l'interdisciplinarité, avec des collaborations fructueuses avec les modélisateurs de la végétation, les modélisateurs démographiques, les généticiens, les archéologues et les historiens. Ces collaborations ont permis des avancées significatives, telles que la modélisation des espèces cultivées anciennes, des transitions forêts/savanes tropicales, et des interactions entre changements paléoenvironnementaux et variations démographiques. Des indices de conservation combinant des données polliniques fossiles, climatiques et de génétique des populations ont également été développés.

Les données paléo produites par les chercheurs de la section 30, telles que les données polliniques et isotopiques, sont mises à disposition de la communauté scientifique (par exemple, *via* l'*European Pollen Database*). Elles sont utilisées par des chercheurs d'autres disciplines pour des comparaisons modèles-données, la calibration de modèles climatiques et de végétation, et l'évaluation des quantités

de biomasse brûlées à l'échelle de l'Europe à l'Holocène.

En conclusion, la paléoécologie en section 30 contribue significativement à la compréhension des interactions entre l'environnement et l'homme sur le long terme. Elle offre des perspectives essentielles pour évaluer les crises actuelles et propose des outils et méthodes innovants pour la gestion des écosystèmes et la conservation des espèces. L'interdisciplinarité et la mise à disposition des données sont des éléments clés de cette approche, permettant des avancées méthodologiques et une meilleure intégration des connaissances à travers différentes disciplines.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

Lors des concours 2022 et 2023, le jury a examiné 17 candidatures en paléoécologie, reflétant la dispersion des forces sur différentes sections. Ce domaine est lié à divers thématiques, notamment la thématique T3. La paléoécologie, face à de nouveaux défis passionnants, nécessite des approches innovantes et interdisciplinaires pour mieux comprendre les écosystèmes passés et leurs réponses aux changements environnementaux, ce qui est crucial pour éclairer notre compréhension des écosystèmes actuels et futurs.

Les défis identifiés pour les prochaines années incluent : i) le **développement de nouvelles techniques analytiques** : l'innovation continue dans les techniques analytiques, comme la spectrométrie de masse à haute résolution et la modélisation avancée, permettra de mieux caractériser les écosystèmes passés et de résoudre des questions complexes ; ii) l'**intégration de données multiproxy** : utiliser une variété de proxys environnementaux pour produire des reconstructions écologiques complètes représente un défi méthodologique et d'interprétation ; iii) **reconnaissance automatisée via machine learning** : le développement de systèmes automatisés de reconnaissance des pollens, basés sur le *machine learning*, permettra de réduire les temps d'acquisition de données et d'améliorer

les identifications taxonomiques, rendant possible la production de données plus résolues temporellement ; iv) **l'utilisation de modèles et simulations informatiques** : intégrer les données paléoécologiques dans les modèles climatiques et écologiques pour prédire les changements passés et futurs est un défi nécessitant des modèles basés sur des processus complexes ; v) **l'archivage et accessibilité des données** : assurer l'archivage à long terme et l'accessibilité des données paléoécologiques *via* des bases de données centralisées et normalisées est crucial pour faciliter leur utilisation par la communauté scientifique.

Ces défis nécessitent une collaboration continue et l'innovation pour renforcer notre compréhension et gestion des écosystèmes.

## **T8 : Ressources environnementales et durabilité**

### **Mots-clés**

Ressources environnementales et durabilité.

### **1. Enjeux et problématiques scientifiques**

Dans le contexte de la section 30, les scientifiques étudient les processus d'épuisement des ressources naturelles, telles que l'eau, les sols fertiles, les combustibles fossiles ou les minéraux et l'équilibre entre la santé des écosystèmes et la préservation des ressources naturelles. Un autre point clé s'attache à comprendre les causes de la perte de biodiversité et ses conséquences sur les services écosystémiques.

### **2. État de l'art : forces et avancées**

Cette thématique ne figurait pas dans le précédent rapport de conjoncture. SI elle n'est déclarée en thématique principale que par 0,3% des effectifs des scientifiques rattachés à la section 30, elle apparaît de plus en plus

fréquemment dans les candidatures au concours CRCN. Il s'agit d'une thématique généralement secondaire mais transverse à de nombreuses recherches (cf. introduction du rapport sur les liens inter-thématiques). On peut néanmoins supposer qu'elle va connaître un intérêt croissant, notamment pour les enjeux de durabilité, qui figurent parmi les défis d'actualité à relever pour les scientifiques comme pour la société dans son ensemble (périmètre général de la section). Cette thématique a également fait l'objet d'un chapitre du rapport de prospective SIC (2023-2028), soulignant son importance croissante. Les ressources environnementales considérées peuvent être notamment l'eau, le carbone, le sol, les nutriments, mais aussi leurs interactions. Ces questionnements font donc intervenir à la fois des outils de modélisation, d'observation, mais aussi de compréhension de la dynamique humaine des sociétés qui font usage de ces ressources.

Ainsi, 7 candidats ou candidates (sur 84) au concours CRCN en 2023 pouvaient émerger à cette thématique, et 5 (sur 104) en 2022, s'intéressant par exemple à la cryosphère, aux systèmes côtiers, ou aux hydrosystèmes. L'une de ces candidatures a fait l'objet d'un recrutement en 2023 sur la durabilité des systèmes agraires à l'échelle globale.

### **3. Faiblesses, verrous et opportunités**

De plus, aucune réponse du sondage envoyé à la communauté par la section 30 n'indique cette thématique (sur environ 110 réponses), ce qui montre sa faible visibilité pour l'instant. Un enjeu serait donc de redéfinir le positionnement et l'affichage souhaité par le CNRS/la section 30 vis-à-vis de cette thématique, par exemple en invitant systématiquement les candidats et les candidates à se référer à une thématique principale et à une thématique transverse parmi les T8, T9 et T10. En effet, les sciences de la durabilité sont confrontées à une série d'enjeux complexes et interconnectés qui nécessitent une approche globale et intégrée pour être résolus. Par exemple : 1) l'impact du changement climatique sur les écosystèmes et les ressources disponibles ;

2) les processus d'épuisement des ressources dites naturelles, et les méthodes de gestion de ces ressources pour assurer leur utilisation à long terme ; 3) effets de la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que de la dégradation de l'environnement sur la santé des écosystèmes. La plupart de ces problématiques sont abordées sous un autre prisme dans les différents thèmes.

De façon complémentaire, la notion de ressource environnementale étant une construction sociale (un objet environnemental qui fait l'objet d'une intention d'usage ou de production), ce type de recherche implique des liens à faire avec les sciences humaines et sociales.

## T9 : Aléas, vulnérabilités et risques environnementaux, restauration, ingénierie écologique et Indicateurs d'état

### Mots-clés

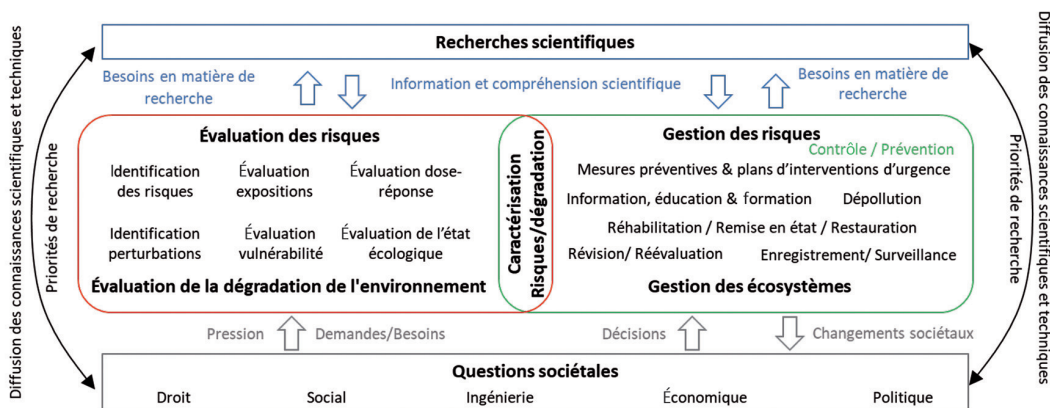
Évaluation du risque, restauration, remédiation, mitigation, ingénierie écologique, indicateurs d'état, solutions basées sur la nature.

## 1. Enjeux et problématiques scientifiques

Les écosystèmes et hydrosystèmes évoluent rapidement sous l'effet des changements climatiques et anthropiques. Face à ces transformations, la communauté des sciences de l'environnement s'organise pour répondre aux enjeux liés aux ressources hydriques et alimentaires, à la biodiversité, à la santé et aux extrêmes climatiques (cf. figure 13). Il est crucial d'identifier des indicateurs pertinents et d'adapter les échelles spatio-temporelles des observations pour produire des données fiables. Comprendre les processus et forçages, notamment climatiques, nécessite des séries de mesures sur plusieurs années. La restauration des systèmes dégradés, *via* des solutions basées sur la nature, repose sur une compréhension approfondie de leur fonctionnement et résilience, essentielle pour des stratégies de gestion et de conservation efficaces.

## 2. État de l'art : forces et avancées

Les projets de recherche de la communauté SIC abordent des questions théoriques jusqu'à l'évaluation des risques et la réhabilitation, intégrant les thématiques des aléas, vulnérabilités et risques environnementaux de manière transversale.



La recherche au regard des enjeux sociétaux en matière de risques et de dégradations environnementales.

Figure 13 : La recherche au regard des enjeux sociétaux en matière de risques et de dégradations environnementales.

Dans les domaines des aléas, risques environnementaux, dégradations environnementales et remédiation, de nombreuses initiatives ont structuré les communautés scientifiques. Ces initiatives se sont organisées autour des écosystèmes continentaux et littoraux, des pressions ou objets d'étude à l'origine des risques (comme les micro-algues, invasions biologiques, plastiques, et nanomatériaux), ou des solutions (comme les innovations en écologie et environnement). Les recherches sur les pollutions et les risques chimiques incluent l'évaluation des risques, le diagnostic environnemental, la réhabilitation, la mitigation/gestion et la dépollution. Les concepts d'organismes sentinelles, de bio-indication, de capteurs et biocapteurs, et de bioremédiation sont bien établis. Ces développements méthodologiques et techniques sont progressivement transférés aux acteurs opérationnels à travers des démarches de normalisation, de brevets, de partenariats avec des agences de l'État (comme les agences de l'eau, l'ANSES, l'ADEME) ou des collectivités, et des démarches de co-construction comme les *living labs*. Les contextes de pollution étudiés se diversifient, incluant les polluants métalliques et organiques historiques ainsi que des polluants émergents (métaux de la transition énergétique, plastiques, PFAS, pesticides modernes), les sites industriels et miniers pollués, les pollutions diffuses, et les contaminants biologiques (cyanotoxines, phycotoxines, gènes de résistance aux antibiotiques).

Les besoins actuels incluent la réponse à des enjeux scientifiques et sociétaux permettant de piloter des actions intégrant des risques multiples et une surveillance proactive. Les recherches portent sur les signaux d'alerte précoce, les multicontaminations, les interactions avec les changements climatiques, les indicateurs de l'état de santé des écosystèmes, les approches de criblage sans a priori, les capteurs passifs, les méthodes *low-cost* et *fast-screening* limitant l'expérimentation animale, et les liens entre pollutions, risques écologiques et risques sanitaires dans une approche *One Health*.

En somme, la communauté SIC est bien positionnée pour répondre aux défis complexes liés aux risques environnementaux grâce à une approche intégrative et transdisciplinaire, soutenue par des structures fédératives et des initiatives de recherche collaborative.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

La communauté SIC possède les compétences nécessaires pour étudier les risques environnementaux, sanitaires et écologiques liés aux impacts anthropiques sur les surfaces et interfaces continentales. Cependant, moins de 1 % des chercheurs de la section 30 se déclarent spontanément dans cette thématique. Les travaux existants se concentrent principalement sur les aléas hydrologiques (crues et sécheresses), les glissements hydro-gravitaires et les aléas côtiers (modification du trait de côte, submersion).

L'intérêt pour cette thématique est plus visible chez les jeunes chercheurs : 12 % des candidatures CRCN des trois dernières années s'y reconnaissent, contre moins de 1 % lors des quatre années précédentes. Cela démontre une dynamique croissante en lien avec des besoins sociétaux pressants et une prise de conscience collective. Les projets autour des aléas hydrologiques et côtiers incluent souvent un volet « restauration » qui considère l'écohydrosystème comme une entité. Les axes émergents couvrent l'écologie des cours d'eau, les effets des forçages sur les écosystèmes côtiers et coraliens, et les interactions entre ces systèmes et le climat.

La sémantique d'aléa, vulnérabilité et risque est souvent associée aux aléas naturels, mais elle s'étend progressivement aux risques sanitaires *via* les travaux en microbiologie environnementale. Si de nombreuses recherches sur les pollutions sont menées dans les laboratoires, elles sont relativement peu revendiquées. Les travaux sur l'ingénierie écologique, les indicateurs et la réhabilitation sont souvent mentionnés de manière marginale. L'identification de thématiques transversales et transdisciplinaires pourrait structurer la recherche, favorisant l'émergence de nouveaux

paradigmes et l'innovation. Les recherches sur les services écosystémiques se développent, mais les liens entre risques, fonctions et services sont inégalement intégrés selon les thématiques. Les travaux sur les risques des pollutions chimiques sont majoritairement menés en silo, en fonction du type d'écosystème, de la classe de polluant ou des réglementations. Le concept d'exosome pourrait rapprocher les communautés autour d'enjeux communs. Les réseaux d'observation des contaminations chimiques sont encore très segmentés, malgré l'accès croissant aux données de suivi. Un constat similaire peut être fait pour les suivis de la biodiversité. Les difficultés de validation des données et d'intégration des dispositifs de surveillance au sein des maillages territoriaux sont des freins au développement de ces thématiques, tout comme les coûts humains et financiers des dispositifs d'observation et des activités analytiques.

Les communautés travaillant sur les différents types de risques et les solutions de gestion associées interagissent peu et expriment des besoins de collaboration avec d'autres domaines de recherche, notamment en modélisation et en sciences humaines et sociales (SHS). Les initiatives de structuration (FR, GA, GDR, OSU) doivent être renforcées pour élargir et consolider les différentes communautés de recherche. Il est nécessaire d'aborder les risques environnementaux, écologiques, sanitaires et sociaux de manière conjointe et intégrée. De nouveaux cadres de travail émergent, mais doivent encore évoluer. Les projets EC2CO, MITI et 80/PRIME ont initié plusieurs travaux portés par des chercheurs de la section. La gestion des risques et des dégradations ainsi que la restauration multifonctionnelle des écosystèmes dégradés doivent intégrer un plus grand nombre de fonctions pour prendre en compte un large panel de risques et de services écosystémiques. Cela constitue un chantier d'ampleur qui nécessitera de créer de nouvelles synergies et de renouveler les besoins en matière d'observation.

En résumé, bien que la thématique des risques environnementaux, sanitaires et écologiques soit encore marginale parmi les chercheurs

de la section 30, elle montre une dynamique forte et croissante. Les jeunes chercheurs s'y intéressent de plus en plus, et les initiatives de structuration des communautés scientifiques devraient permettre d'aborder de manière intégrée les enjeux complexes liés aux risques et aux dégradations environnementales. Les collaborations transdisciplinaires et les innovations méthodologiques sont essentielles pour répondre aux défis sociétaux actuels et futurs.

## **T10 : Développement d'outils et méthodes d'observation appliqués à des problématiques environnementales**

### **Mots-clés**

Instrumentation, télédétection, géophysique, imagerie, surface, subsurface.

### **1. Problématique scientifique**

Qu'elles soient *in situ*, de proxy-détection ou spatiales, en laboratoire ou *in natura*, les observations sont centrales aux travaux des chercheurs et chercheuses de la section 30. Ce thème est donc transverse aux grandes thématiques scientifiques qui animent la section 30. Il couvre le développement de nouveaux capteurs pour l'observation de l'environnement incluant les réseaux de capteurs à bas coût, la conception et le déploiement de nouveaux dispositifs expérimentaux, la télédétection des écohydro-systèmes, le développement méthodologique de nouveaux algorithmes d'observation, les techniques d'imagerie de surface et subsurface.

### **2. État de l'art : forces et avancées**

De nombreux chercheurs et chercheuses développent et exploitent des outils et des méthodes d'observation de l'environnement



dans cette section. Les géophysiciens, par exemple, se concentrent sur la cartographie des structures de subsurface, la dynamique des flux d'eau, la réactivité chimique, et les contaminations du sol en utilisant des mesures non invasives de surface (résistivité électrique, polarisation induite, etc.), des puits, ou de l'imagerie satellitaire. Ces activités sont internationalement reconnues grâce à quelques chercheurs de premier plan. À grande échelle, ces travaux ont amélioré la compréhension des échanges entre grands compartiments hydriques (glaciers, lacs, rivières, nappes). À l'échelle du bassin versant, les recherches se concentrent sur les transferts hydriques aux interfaces sol-végétation-atmosphère et sur la structure des aquifères hétérogènes (socle, karst), avec pour objectif de contraindre les modèles d'écoulements en zone non saturée et saturée. Des modèles inverses basés sur des algorithmes originaux sont développés pour extraire les propriétés hydrodynamiques des aquifères, et des capteurs de résonance magnétique protonique innovants sont utilisés en forage. À une échelle plus petite (centimétrique), un axe de recherche utilise la géophysique combinée à la microfluidique pour étudier le transport réactif, comme la réactivité des carbonates ou la propagation de fluides non newtoniens. La communauté en télédétection spatiale des surfaces continentales, notamment aux pôles grenoblois et toulousains, est très visible internationalement. Ils jouent un rôle clé dans le lancement de missions d'observation de la Terre novatrices (SWOT, FLEX, THRISHNA, BIOMASS). La quantité de données acquises a explosé grâce au programme Copernicus, permettant des développements méthodologiques inédits pour accéder à des informations sur les surfaces continentales, telles que l'humidité des sols, la surface enneigée à haute résolution, l'occupation du sol, et la dynamique du couvert végétal. Des informations de haut niveau, comme les apports d'eau d'irrigation ou des indices de suivi des sécheresses, sont obtenues grâce à la démocratisation des méthodes d'intelligence artificielle.

La télédétection apporte également des informations importantes pour l'hydrodynamique, la morphologie côtière, et la

sédimentation estuarienne. Ces nouvelles données permettent aux laboratoires spécialisés dans la modélisation du climat (LSCE, CNRM) de renforcer leurs systèmes d'assimilation des surfaces continentales (*Land Data Assimilation System* - LDAS). La disponibilité de données ouvertes a permis le développement de services opérationnels, comme un système de suivi de l'enneigement sur les massifs européens. Des méthodes photogrammétriques avec des données à haute résolution (missions PLEIADE et CO3D à venir) sont développées pour cartographier la bathymétrie des réservoirs saisonniers ou les variations de volume de neige et de glace. Le dispositif DINAMIS, qui donne un accès privilégié aux données Pléiades et SPOT après une catastrophe naturelle, est un atout pour la communauté française. Ces nouvelles données ont conduit à des inventaires globaux inédits (glissements de terrain, arbres et stock de carbone au Sahel, inventaire des plans d'eau de petite taille) grâce à des méthodes de fouille de données et de l'IA.

En paléoclimatologie et paléoécologie, les chercheurs exploitent des archives paléoenvironnementales classiques ou en proposent des nouvelles, analysant des traceurs et biomarqueurs pour reconstituer la végétation, le climat du passé, la démographie, et les pratiques humaines en interaction avec les changements climatiques. Le développement de techniques pour l'étude de l'ADN environnemental ancien offre une fenêtre unique sur le passé de la biodiversité et de l'environnement, permettant de reconstruire la diversité génétique des espèces passées et d'étudier les changements des communautés biologiques dans le temps. Cela contribue à comprendre l'impact des changements climatiques, des modifications du paysage, et d'autres perturbations environnementales sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Malgré l'ancienneté de certaines disciplines (par exemple, palynologie), des développements sont en cours pour augmenter la résolution taxinomique des bio-indicateurs (phytolithes, pollens, macro-restes) *via* des analyses morphométriques. De nouvelles méthodes géochronologiques, telles que la datation par

isotopie cosmogénique, sont également développées.

En écologie, outre la mesure des variables abiotiques pour caractériser l'environnement physique des êtres vivants, le *biologging*, qui consiste à placer des capteurs miniatures sur la faune sauvage terrestre et marine, se développe et donne lieu à des innovations instrumentales. Une communauté dynamique de chercheurs en sciences de l'environnement exploite les rayonnements synchrotrons et neutron pour l'étude de la spéciation des contaminants et la compréhension de leur dynamique multi-échelle aux interfaces minérales et biologiques. Ces études s'appuient principalement sur les dispositifs français des synchrotrons SOLEIL (Saclay) et ESRF (Grenoble) ainsi que le réacteur à neutron de l'institut Laue-Langevin (Grenoble). Les développements instrumentaux constants sur ces infrastructures permettent des avancées scientifiques importantes dans l'étude des éléments traces et des processus naturels avec des dynamiques temporelles de plus en plus courtes. L'analyse thermique Rock-Eval® est aussi prometteuse pour améliorer la compréhension de la dynamique du carbone dans le sol.

De manière plus transverse, de nouvelles méthodes d'observation sont développées en détournant certaines observations de leur objectif initial, aboutissant à des innovations (radar bi-statique grâce au signal GNSS pour le suivi de l'humidité du sol ; observations sismologiques pour la détection et le suivi des crues, du transfert de matière, ou des glissements de terrain ; méthodes sismiques pour suivre l'évapotranspiration des couverts végétaux ; observations gravimétriques pour suivre l'érosion continentale et le transport de sédiments par les grands fleuves ; variation des masses d'eau continentales grâce à l'analyse des trajectoires cinématiques de constellations de satellites non dédiés à la mesure du champ de gravité). Ces travaux peuvent préfigurer les capteurs de demain (mission spatiale hydro-GNSS).

Ces dernières années, la démocratisation de l'utilisation des drones a offert aux chercheurs l'opportunité d'aborder des questions non

élucidées grâce à ces nouvelles données finement résolues, conduisant à des avancées couvrant une grande partie des thématiques de la section. Couplés au lidar, par exemple, les drones ont permis une meilleure compréhension de la dynamique du littoral et de la morphologie côtière. Les chercheurs de la section participent également au développement de réseaux de capteurs environnementaux à bas coût pour renforcer l'observation des dynamiques biotiques et abiotiques et densifier les dispositifs expérimentaux. Enfin, les méthodes de fouille de données et d'intelligence artificielle ont permis des avancées significatives pour l'amélioration de l'observation des écosystèmes et de la zone critique au sens large.

### 3. Faiblesses, verrous et opportunités

La majorité des chercheurs et chercheuses de la section 30 utilisent des observations environnementales, mais peu en font leur thème principal, ce qui peut nuire à leur visibilité et structuration. Une meilleure organisation pourrait s'appuyer sur des réseaux comme le Réseau Technologique sur les Capteurs en Environnement (RTCE) et l'Equipex + Terraforma, qui fédèrent déjà des communautés autour de la métrologie et de l'observation environnementale.

En hydro-géophysique, deux enjeux majeurs sont la caractérisation des milieux souterrains complexes, comme les karsts, et le développement de méthodes pour étendre les observations ponctuelles à une information 4D distribuée. La technique de la fibre optique (*distributed acoustic sensing*) est prometteuse, transformant le réseau commercial de fibres optiques en un immense réseau de capteurs pour surveiller et alerter sur les aléas naturels.

En télédétection spatiale, un défi majeur reste la reconstruction de données historiques sur de longues périodes pour unifier les séries acquises par différents capteurs et dispositifs expérimentaux, crucial pour étudier les tendances et ruptures. L'amélioration des résolutions spatio-temporelles pour les ressources en eau souterraine et les champs pluviométriques

pour l'hydrologie urbaine et les usages agricoles est également prioritaire. Des études récentes montrent que combiner ces données avec des techniques de géodésie spatiale (GNSS, InSAR et altimétrie) est prometteur pour le suivi des ressources en eau souterraine. Des défis méthodologiques subsistent pour exploiter pleinement les observations spatiales dans des environnements complexes (montagneux, couverts denses) et pour valoriser l'abondance de données à haute résolution spatiale grâce à l'IA. La combinaison des données des missions spatiales à venir (TRISHNA, FLEX, BIOMASS) devrait réduire les incertitudes sur le bilan carbone des écosystèmes terrestres. Le programme TOSCA du CNES joue un rôle structurant, et les services de traitement offerts par le pôle form@terre, avec le soutien du CNES et l'expertise du CNRS, sont essentiels. Il est également crucial de maintenir des moyens d'observation aéroportés, notamment par lidar et imagerie hyperspectrale.

En écologie, les méthodes d'éco-acoustique, qui permettent de suivre la biodiversité et les comportements de la faune sauvage à travers l'enregistrement de paysages sonores et des méthodes de traitement du signal, connaissent un engouement international mais sont peu exploitées dans la section. Les récents développements du synchrotron ESRF, le premier synchrotron de 4<sup>e</sup> génération à haute énergie, offrent des analyses encore plus précises des systèmes environnementaux, un atout précieux pour étudier les interactions polluants-minéral/organique à toutes les échelles.

L'explosion de la quantité de données disponibles nécessite des capacités accrues de traitement et de stockage. L'évolution des types de données acquises par les drones et leurs caractéristiques soulève des défis du FAIR (faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables) et de traitement des données. La « fairisation » des données collectées est une préoccupation dans toutes les thématiques de la section.

L'avènement du *machine learning* dans l'observation environnementale appelle à une vigilance : ces approches ne doivent pas remplacer le développement de modèles

d'observation basés sur des équations physiques, nécessaires pour comprendre le signal et le contenu informatif des observations. Une collaboration étroite avec les mathématiciens, numériciens et *data scientists*, notamment avec la CID 55, est indispensable. Des verrous technologiques sur l'instrumentation, le calcul et les données ont été identifiés, touchant l'utilisation des nano-satellites, les nouveaux capteurs environnementaux (*low-cost*, adaptés aux milieux extrêmes), la convergence entre calculs et analyses de données à hautes performances, les applications IA *via* l'apprentissage automatique, et l'accès ouvert aux données scientifiques.

---

## V. Points de vigilance et recommandations

---

### A. Financement de la recherche

Les programmes de recherche comme ANR et ERC, ainsi que ceux des structures (Idex, Labex, EquipEX), financent les recherches actuelles. L'évolution de la politique et des financements par projets est cruciale pour la recherche en France. L'ANR, en particulier, est un instrument de financement essentiel, mais le taux de réussite est extrêmement bas, décourageant les chercheurs. Les financements de montants modestes pour des projets courts restent cruciaux. Les ressources financières fluctuent significativement entre les niveaux internationaux, nationaux et régionaux.

### B. Évolution du métier de chercheur et télétravail

L'enquête auprès des DU révèle des ressentis variés des chercheurs face à l'évolution de leur métier et à la mise en place du télétravail. Les chercheurs expriment des sentiments allant

des pressions accrues dues à la concurrence pour les financements et aux exigences administratives, aux opportunités stimulantes offertes par les nouvelles méthodes et technologies. La formation et le développement professionnel sont nécessaires pour s'adapter à ces évolutions. La collaboration et l'interdisciplinarité croissantes sont perçues à la fois comme des opportunités et des défis, obligeant certains à travailler en dehors de leur expertise habituelle. La communication scientifique est devenue cruciale, incluant les publications académiques, la vulgarisation et la participation sur les médias sociaux. Toutefois, les nouvelles valeurs écoresponsables ne sont pas encore largement mentionnées. Quant au télétravail, les avis sont partagés. Il offre une flexibilité appréciée mais pose des défis en termes de collaboration, bien-être et adaptation des méthodes de travail. Les risques incluent une moindre interaction informelle, des échanges d'idées spontanés réduits et des difficultés dans l'encadrement des étudiants.

### **C. Recherche fondamentale au service de la société**

Il est essentiel de réaffirmer l'importance de la recherche fondamentale face aux acteurs socio-économiques et politiques. La recherche fondamentale garantit la qualité et l'innovation scientifique. La section 30 couvre de nombreuses thématiques, mais le nombre de postes de chercheurs est faible, risquant de compromettre certaines disciplines bien établies.

### **D. Sciences participatives et citoyennes**

L'implication des scientifiques dans la diffusion de la culture scientifique et la médiation vers le grand public est soutenue, mais reste peu valorisée dans le cadre du recrutement et de l'évaluation. Les *living labs* sensibilisent le

public aux enjeux environnementaux et soutiennent les sciences participatives, bien que leur gestion temporelle soit complexe pour les chercheurs. Les scientifiques sont encouragés à dialoguer avec la société pour améliorer la perception de la science et maintenir la confiance au-delà des annonces politiques et médiatiques. Des événements récents, comme les débats sur les mégabassines et le plan éco-phyto, ont perturbé la perception publique du rôle des chercheurs. L'analyse bibliographique montre que les chercheurs de la section et des laboratoires associés sont bien positionnés pour répondre à ces enjeux. Il est crucial de reconnaître et d'engager les chercheurs dans une structure d'experts dédiée aux débats science-société dans le domaine de l'environnement.

### **E. Big data et partage des données**

La gestion et le traitement d'un volume croissant de données issues de technologies variées (capteurs, télédétection) nécessitent une réflexion sur l'optimisation du stockage et la gestion des données, en respectant les principes FAIR. Le réseau national des ateliers de la donnée, soutenu par le projet Recherche Data Gouv, vise à éviter la dispersion des bases de données et à accompagner la communauté dans l'analyse du cycle de vie des données, en synergie avec des infrastructures d'observation comme Dat@OSU et OSU Thêta. Des portails comme Récolnat, la Cyber Carothèque nationale et le réseau Régef facilitent la description des métadonnées de collections d'objets naturels et d'échantillons. Les infrastructures de données dédiées au stockage, à la gestion et au partage des données de recherche incluent des bases de données disciplinaires, des dépôts institutionnels, des archives gouvernementales et des référentiels internationaux. Les pratiques de dépôt incluent des métadonnées détaillées pour la découverte, la compréhension et l'utilisation des données. Cependant, l'impact environnemental de ces activités

nécessite des recommandations, comme celles diffusées par CNRS Biologie, pour sélectionner les données à conserver.

## F. Science ouverte

La science ouverte vise à rendre accessibles librement et gratuitement les échantillons, données, méthodes, scripts, logiciels, codes, publications, évaluations et processus éditoriaux, en appliquant les principes FAIR aux données et métadonnées. Elle améliore la traçabilité et la reproductibilité de la science.

Les pratiques de publication et de partage de données ont évolué, permettant aux chercheurs de partager leurs travaux *via* des prépublications sur des archives ouvertes comme arXiv et bioRxiv, facilitant une diffusion rapide et une discussion ouverte. Toutefois, le modèle de publication avec comité de lecture reste essentiel pour garantir la qualité. Le dépôt des publications dans des archives ouvertes comme HAL, obligatoire pour les chercheurs CNRS et en progression chez les universitaires, accroît la visibilité de la communauté.

Le CNRS encourage à éviter les revues payantes, entraînant la création de revues diamant et le système de *peer-review* de l'association Peer Community In. Pour prévenir les dérives d'intégrité scientifique, des modèles comme les *registered reports* sont proposés. La science ouverte favorise aussi le partage des données de recherche, augmentant la transparence et permettant la reproductibilité et la réutilisation des résultats. De nombreux financements de recherche exigent désormais la mise à disposition des données dans des archives ouvertes.

## G. Empreinte environnementale

Au cours de cette dernière mandature, la prise de conscience de l'empreinte environnementale de la recherche a progressé. En 2019,

le CNRS a établi son BGES et, en 2022, a lancé un plan de transition bas carbone abordant les achats, le numérique, la mobilité et l'énergie. Le Comité d'éthique du CNRS a aussi traité de l'impact environnemental de la recherche. La question clé est de préserver l'excellence tout en réduisant l'empreinte carbone et en améliorant la qualité de vie au travail. La mutualisation des équipements *via* des plateaux techniques et plateformes au sein des UMR contribue à cet objectif, bien que cela puisse éloigner le personnel technique des thématiques de recherche. Le développement de méthodologies d'évaluation de l'impact environnemental se renforce pour contrer la dissonance cognitive. Le groupe de travail « Sobriété et recherche », en collaboration avec la CPCN, a adressé des recommandations pour les évaluations, promotions et recrutements du personnel, ainsi que pour l'accompagnement des mobilités thématiques des chercheurs. Ces efforts visent à adapter les pratiques et l'évaluation de la recherche aux défis environnementaux, comme illustré par des initiatives telles que GDR Labos 1point5 et Atelier SENs.

## Conclusion

La section 30 du CNRS, nommée « Surface continentale et interfaces », rassemble une large communauté de scientifiques spécialisés dans les sciences de l'environnement. Leurs recherches se concentrent sur la caractérisation et la modélisation des écosystèmes et hydrosystèmes, y compris les milieux urbains, agrosystèmes, estuariens, lagunaires, côtiers et marins. L'objectif principal est de comprendre et prédire les impacts des perturbations environnementales, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, sur ces milieux. La section est le fruit de l'intégration de spécialistes des sciences de la Terre et de l'écologie, et elle est rattachée à CNRS Terre & Univers ainsi qu'à CNRS Écologie & Environnement. La pluridisciplinarité y est essentielle, combinant la biologie, la physique et la chimie pour

## Comité national de la recherche scientifique

---

renforcer les connaissances fondamentales sur l'environnement.

Le concept central de leurs recherches est la « zone critique », qui est définie comme la couche superficielle de la Terre, inclut les interactions entre la roche, les eaux, l'air et la biosphère. Cette zone s'étend de la canopée aux zones de recharge des eaux souterraines, englobant les écosystèmes terrestres, côtiers et hydrosystèmes. Les initiatives OZCAR et RZA, structurées par CNRS Terre & Univers et CNRS Écologie & Environnement, visent à renforcer les liens entre les communautés scientifiques et à promouvoir ce concept de zone critique. Les études se concentrent particulièrement sur les interfaces « Terre-eau » comme les zones humides, ripariennes, estuaires et littorales, qui sont cruciales pour les échanges de matière entre les systèmes terrestres et aquatiques. Comprendre les processus hydrologiques et biogéochimiques à ces interfaces, couplés avec des approches d'écologie et de paléoécologie, est essentiel pour modéliser le fonctionnement des écosystèmes.

Les chercheurs de la section 30 étudient de manière intégrée les interactions entre processus hydrologiques, biogéochimiques et écologiques. Ils prennent en compte les interactions sol-eau-végétation et le compartiment microbien, ce qui permet une meilleure compréhension des mécanismes de transfert d'eau, de nutriments et de contaminants. Ces interactions influencent la dynamique morphologique des cours d'eau, la qualité de l'eau, la biodiversité et la résilience des écosystèmes face aux changements environnementaux. Ces recherches permettent également une évaluation plus précise des effets des changements globaux sur les régimes hydrologiques, les risques d'inondation, l'érosion côtière, la disponibilité des ressources en eau et le développement de stratégies d'adaptation. Une partie importante des recherches se concentre sur les interactions entre les êtres vivants et leur environnement, ainsi que sur les processus écologiques régissant la structure et la fonction des écosystèmes. Elles étudient aussi les impacts des activités humaines sur les écosystèmes sur des échelles temporelles allant de plusieurs décennies à

plusieurs millénaires, cherchant à identifier les seuils de résistance, de résilience et d'irréversibilité des altérations anthropiques.

Les avancées récentes sont fortement liées aux évolutions des modélisations hydrologiques et biogéochimiques. Ces modèles permettent de simuler plus précisément les flux d'eau, de solutés, de sédiments et de contaminants à différentes échelles spatiales et temporelles, intégrant davantage de processus et améliorant ainsi la compréhension des transferts de nutriments, de polluants et de matière organique. Ils aident à prédire leur évolution future et leur impact sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes aquatiques. De plus, les développements méthodologiques en écologie et écotoxicologie, tels que les approches omiques, la modélisation spatialement explicite et les analyses basées sur les traits, ont permis de mieux comprendre les impacts des changements globaux sur le fonctionnement des écosystèmes. Ils fournissent des bases pour l'éclairage scientifique et la production d'outils d'aide à la décision.

Cependant, les chercheurs doivent surmonter plusieurs défis, notamment la nécessité de mesures continues de paramètres précis, la disponibilité d'états de référence et de suivis à long terme, ainsi que la mise en œuvre d'expérimentations complexes. Des bases de données robustes et fournies sont indispensables. L'assise expérimentale est essentielle pour comprendre les processus agissant de manière synergique dans les conditions naturelles. Le réseau d'infrastructures d'observations et d'analyses constitue un atout majeur pour la communauté. La modélisation joue un rôle crucial dans de nombreux domaines de recherche de la section 30. Elle fournit des outils puissants pour étudier les processus environnementaux, prédire les tendances futures, évaluer les impacts des changements globaux sur les écosystèmes et les ressources naturelles, et accompagner les politiques de gestion des milieux.

Les recherches en section 30 sont souvent interconnectées, impliquant des collaborations interdisciplinaires et transdisciplinaires, notamment grâce aux zones ateliers. Ces collaborations permettent d'aborder des questions

Section 30 - Surface continentale et interfaces

---

complexes liées à l'environnement, à la qualité et à la durabilité des ressources naturelles, en échangeant des connaissances entre chercheurs, gestionnaires des hydro-éco-systèmes et décideurs. En prenant de plus en plus en

compte les problèmes touchant directement la société, elles favorisent les échanges de connaissances et contribuent à des décisions éclairées en matière de gestion environnementale.

