



HAL
open science

Livre Blanc - Paléoclimats et Paléoenvironnements

Pascale Braconnot, Guillaume Leduc, Fabien Arnaud, Doris Barboni, Franck Bassinot, P. Blard, Jean-Renaud Boisserie, Sylvie Bourquin, Brian M. Chase, Frédérique Eynaud, et al.

► **To cite this version:**

Pascale Braconnot, Guillaume Leduc, Fabien Arnaud, Doris Barboni, Franck Bassinot, et al.. Livre Blanc - Paléoclimats et Paléoenvironnements. CNRS, 147 p., 2024. hal-04530506

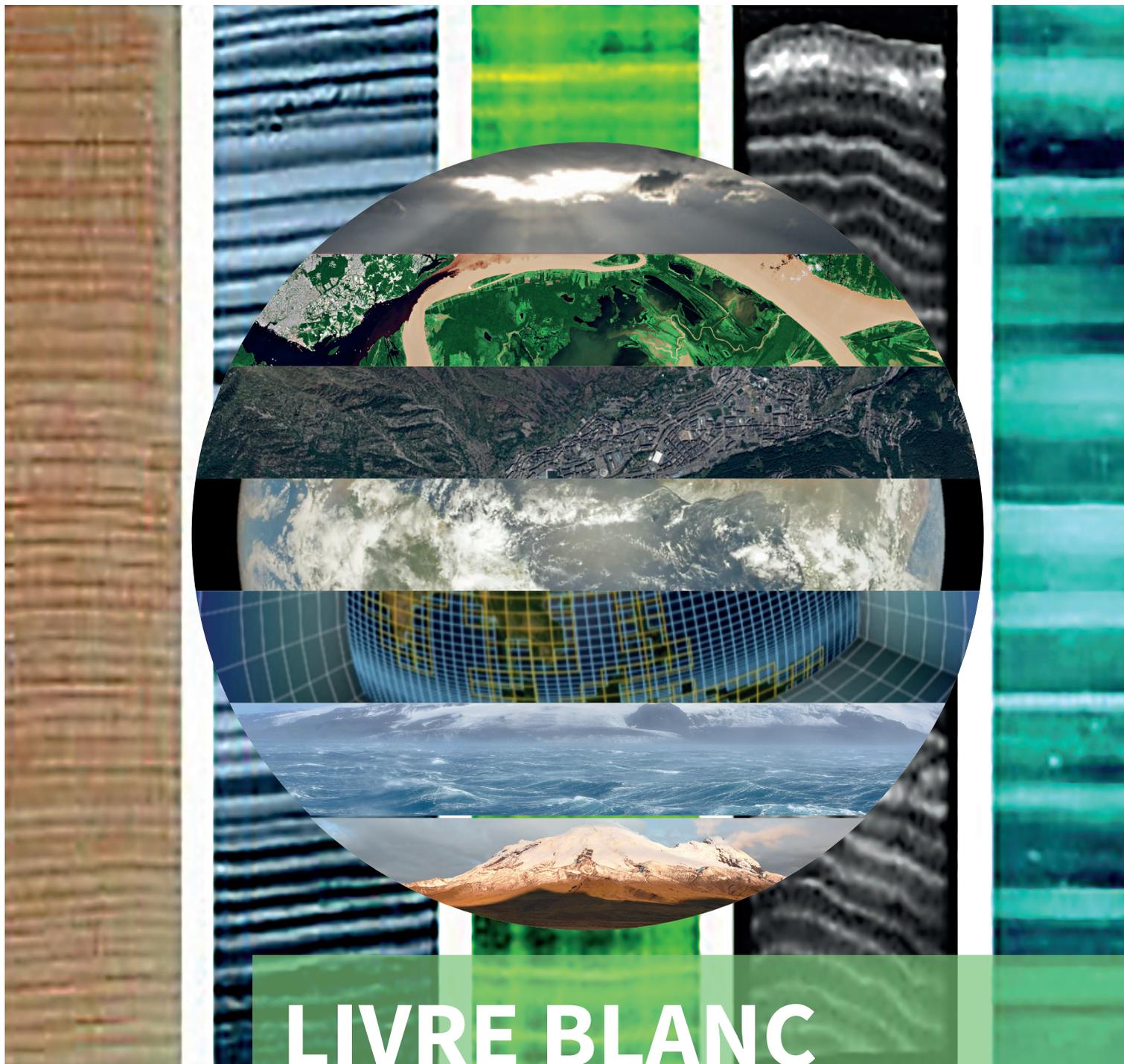
HAL Id: hal-04530506

<https://amu.hal.science/hal-04530506>

Submitted on 2 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



LIVRE BLANC

PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Livre Blanc paléoclimats et paléoenvironnements

ÉTAT DES LIEUX ET PROSPECTIVES DES RECHERCHES MENÉES EN FRANCE

Comité de rédaction

Fabien Arnaud, Doris Barboni, Franck Bassinot, Pierre-Henri Blard, Jean-Renaud Boisserie, Sylvie Bourquin, Pascale Braconnot, Brian Chase, Claire Delhon, Frédérique Eynaud, Thibault de Garidel-Thoron, Jérémy Jacob, Myriam Khodri, Amaelle Landais, Guillaume Leduc, Bruno Malaizé, Patricia Martinerie, Cecile Robin, Buno Turcq, Boris Vannièrè, Buno Wilhelm.

Sous la coordination de Pascale Braconnot – Présidente du comité du Livre blanc et Guillaume Leduc – Secrétaire du comité Livre blanc.

Coordination éditoriale

Anne Brès, Julie Amblard

Impression

CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Conception / Maquette

CBA Design / Page B

Février 2024

LIVRE BLANC

PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS



TABLE DES MATIÈRES

EDITORIAL	7
REMERCIEMENTS	9
INTRODUCTION	10
Les activités en regard de la nécessaire réduction de l’empreinte carbone	11
SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS	13
Positionnements thématiques et à l’international	14
Grands axes de recherches et questions scientifiques pour les années à venir	15
Infrastructures, instrumentation et développements technologiques	16
Financements et recrutements	17
Synergies au sein de la communauté française, animation de la recherche	18
ÉLABORATION DU LIVRE BLANC	19
Le comité livre blanc et les différentes étapes	21
Groupes de travail	24
A – ÉTAT DES LIEUX	27
A1. Les recherches « Paléoclimats et Paléoenvironnements » en France	31
A2. Infrastructures nationales et internationales mobilisées	45
A3. Principales évolutions thématiques des dernières années et opportunités	53
A4. Financements des projets sur les 20 dernières années	59
A5. Formation et recrutements sur les 20 dernières années	67
A6. Synthèse des forces et faiblesses	71
B – PROSPECTIVE	73
Préambule	75
B1. Grandes orientations scientifiques	79
B2. Quelques défis scientifiques spécifiques à relever	91
B3. Collecte et accès aux archives	99
B4. Développements analytiques	107
B5. Modélisation, simulations, intelligence artificielle	111
B6. La gestion et l’exploitation des données	119
B7. Consolider la communauté nationale P&P	123
B8. Science et société	127
CONCLUSION	129
BIBLIOGRAPHIE	131
ANNEXES	133
Tableaux de synthèse des réunions nationales	133
Acronymes	139
Contributeurs	143

Au commencement était le passé. Nées du besoin de comprendre le présent ainsi que les mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui régissent notre planète, les sciences «paléo», comme on les appelle parfois, explorent la profondeur du temps indissociable des sciences de la planète et de la vie. La démonstration du changement climatique en cours, de son ampleur et de sa rapidité sans précédent dans l'histoire de la Terre, n'est pas le moindre des succès de cette approche. Au fil des décennies, une communauté s'est formée, partageant des concepts et des approches multi- ou interdisciplinaires, maîtrisant de nombreuses disciplines et métiers, et mobilisant des outils spécifiques : des campagnes de terrain, des analyses en laboratoire, des instruments innovants, de la modélisation et des comparaisons entre données et modèles.

Ce livre blanc est le fruit d'un travail majeur de prospective de la communauté scientifique «Paléoclimats et Paléoenvironnements», qui renouvelle profondément la vision datant de 1998. Fruit du travail d'une large communauté académique au-delà des frontières institutionnelles, ce livre blanc montre la richesse et le dynamisme de la communauté, très ouverte à l'international, mais aussi les fragilités inhérentes à une approche par essence interdisciplinaire qui masque parfois sa visibilité et peut complexifier la recherche de moyens dédiés. Cette analyse en profondeur révèle aussi le défi de rapprocher de façon encore plus agile les données et les modèles, en continuant à effacer les silos disciplinaires ou les frontières entre les approches «paléo» et «contemporaines».

Les communautés paléo sont au cœur des grands enjeux des communautés scientifiques des Sciences du Système Terre et de la biosphère. Enjeux scientifiques d'abord avec des questions majeures : la compréhension et l'intégration des processus couplés climat-environnement, les forçages biotiques et abiotiques et les effets de seuils sur l'évolution des écosystèmes, et le nexus Sociétés-Climat-Écosystèmes récapitulé dans la notion de socio-écosystèmes. Ces trois questions sont au cœur de la problématique de l'habitabilité de la Terre à laquelle les recherches sur le passé peuvent contribuer à comprendre le présent et à anticiper l'avenir. Enjeux méthodologiques ensuite car la dynamique des recherches se reflète dans la production d'un volume conséquent d'archives, de données et de référentiels dont il convient d'assurer la découverte, la préservation et l'utilisation par le plus grand nombre, en développant un archivage et un référencement pérenne des échantillons et des données. Enjeux de partage, de formation et de médiation enfin puisque cette compétence unique doit être transmise et mieux partagée encore pour accroître le nombre de collègues venant contribuer à l'effort collectif.

Des pistes sont tracées dans ce livre blanc pour soutenir et renforcer davantage la communauté dédiée aux approches P&P, à travers des programmes partagés, des outils de curation des échantillons et des données, ainsi que le développement d'outils numériques et de modèles communautaires. Il constituera pour les directions de l'INSU et de l'INEE, et au-delà tous les partenaires impliqués, le socle sur lequel construire une synergie renforcée au service des communautés P&P.

Nicolas Arnaud et Stéphane Blanc

REMERCIEMENTS

Ce livre blanc « Paléoclimats et Paléoenvironnements » n'aurait pas pu voir le jour sans l'apport de nombreuses personnes qui ont soutenu l'initiative ou répondu aux appels du comité livre blanc, mis en place pour en coordonner la réalisation.

Nous devons l'élan donné à l'élaboration de ce livre blanc aux directeurs des unités océan-atmosphère abritant des activités paléo. Issus du LSCE, puis de EPOC, du LOCEAN, du CEREGE, ce premier appel a rencontré l'enthousiasme de nombreux collègues du domaine INSU-OA inquiets pour le devenir de leur thématique et lancé une première dynamique.

L'INSU a saisi la balle au bond et apporté un fort soutien tout au long de la démarche. C'est également sous l'impulsion de la direction de l'INSU que les réflexions se sont élargies aux autres domaines et instituts du CNRS (principalement l'INEE et l'INSHS), qui sont restés à l'écoute et que nous remercions chaleureusement pour l'intérêt porté à l'évolution des questionnements au long des 3 années de gestation.

La démarche a largement débordé les frontières du CNRS pour embarquer les personnels des différents organismes de recherche et des universités s'investissant dans les thématiques « paléoclimats et paléoenvironnements ». Nous remercions l'ensemble de la communauté pour sa réactivité et les nombreux échanges constructifs qui ont permis de caractériser les activités menées dans nos laboratoires et formaliser les grandes orientations à venir dans un domaine de recherche qui embrasse de multiples facettes.

Les objectifs étaient ambitieux. Les groupes de travail du comité ont mobilisé de nombreuses personnes pour mener l'analyse bibliométrique, définir la taille de la communauté, identifier les sources de financement, répertorier les différentes formations ou nous aider à réfléchir à la façon de mener les études de façon ouverte avec un souci d'innovation dans le long terme. Nous remercions tous ces collaborateurs pour le temps précieux qu'ils nous ont accordé. Ces apports permettent une cartographie la plus objective possible de la communauté.

L'ANR a lancé la rédaction d'un cahier ayant des intersections avec les questions couvertes par le livre blanc. Nous remercions les personnes en charge de ce cahier pour les interactions entre les deux initiatives et nous avoir invité à présenter le livre blanc lors de la sortie du cahier ANR.

Nous avons regroupé la liste de tous les contributeurs à la fin du livre blanc.

Cette aventure collective a hélas été entachée de la disparition de Bruno Whilhelm, membre très actif du comité livre blanc qui nous a quitté trop tôt. Nous lui dédions ce document.

INTRODUCTION

Le comité du livre blanc « paléoclimats et paléoenvironnements » a été mis en place par l'INSU, suite à une manifestation d'inquiétude de plusieurs directeurs d'unités, avec la commande d'intégrer dans la réflexion l'ensemble des domaines de l'INSU et les instituts du CNRS directement concernés. Ses objectifs étaient de recenser les forces et les difficultés rencontrées par la communauté « Paléoclimats & Paléoenvironnements » et d'identifier les verrous scientifiques et structurels qui, une fois levés, permettront de répondre de façon concertée et collective aux nouveaux défis scientifiques et techniques. La feuille de route telle qu'établie au démarrage du comité fait ainsi apparaître différents éléments sur l'état des recherches dans le domaine. Il s'agissait :

- De proposer un état des lieux des activités « Paléoclimats et Paléoenvironnements » en France (instituts et laboratoires concernés, personnel impliqué...), des atouts et du positionnement de nos recherches à l'international ;
- D'identifier les communautés particulièrement menacées si un effort substantiel de financement ou de recrutement n'est pas mené à bien ;
- De faire un bilan des besoins en ressources humaines et identifier quelques débouchés porteurs attractifs pour les jeunes chercheurs ;
- De faire un bilan des besoins de maintenance et de renouvellement des parcs instrumentaux, en identifiant aussi les développements technologiques majeurs que la France ne doit pas manquer ou pour lesquels elle peut même briguer une position de leader.

Des attentes sur la prospective ont également guidé les débats. Le travail du comité, en lien avec la communauté concernée, a donc également eu comme objectifs :

- De définir les grands axes de recherches et les questions scientifiques qui vont sous-tendre l'activité dans les 10-20 ans à venir ;
- De mettre en lumière les verrous que nous pourrions faire sauter en renforçant, en particulier, les synergies au sein de la communauté française afin de mieux tirer parti de la complémentarité des approches (scientifiques, techniques et méthodologiques) ;
- D'identifier les besoins d'infrastructures et d'investissements qu'il faudrait mettre en œuvre à court et moyen termes pour permettre une politique scientifique ambitieuse.

Cette feuille de route a guidé le travail du comité pour établir les grandes rubriques du livre blanc. Il est organisé en deux grandes parties présentant respectivement l'état des lieux (partie A) et la prospective (partie B). La synthèse et recommandations est insérée en amont de ces parties de façon à mettre en relief les différents points étayés dans le document. La méthode de travail et les étapes d'élaboration du livre blanc sont également spécifiées pour mettre en contexte les différentes analyses réalisées par les membres du comité. Il s'agit d'une œuvre collective qui s'est appuyée sur de nombreuses contributions.

Les activités en regard de la nécessaire réduction de l’empreinte carbone

Les activités de recherche en P&P et la communication des résultats éclairent la société et les décideurs sur les changements climatiques et environnementaux actuels. En ce sens, notre communauté porte une responsabilité particulière, effectue une veille sur l’état de la planète et dispose d’une surface de communication grandissante. Les campagnes de terrain apportant des connaissances visant à mieux comprendre le Système Terre et participant à l’effort d’anticipation de son évolution future nécessitent cependant des moyens logistiques lourds et ont une empreinte environnementale non négligeable. Ces aspects scientifiques et sociétaux de nos métiers sont inexorablement amenés à se développer et impliquent un devoir d’exemplarité vis à vis de la société.

La montée en puissance des démarches pour réduire l’empreinte environnementale de nos pratiques scientifiques devra combiner des efforts alliant une politique globale des tutelles, une meilleure utilisation des infrastructures utilisées lors des campagnes de terrain, et des efforts vers la sobriété à l’échelle des laboratoires, notamment en prenant appui sur l’initiative des labos 1.5.

Les politiques des tutelles peuvent également faciliter la réduction de l’empreinte de nos métiers en (I) facilitant les trajets internationaux en finançant les voyages en train, (II) incluant des critères de lutte contre l’obsolescence programmée dans les marchés (durée de vie des matériels, disponibilité des pièces détachées, etc.), (III) favorisant l’isolation thermique des bâtiments, etc. Ces réductions d’empreinte de nos activités passeront donc nécessairement par des adaptations des marchés et des investissements pour adapter les infrastructures de recherche à nos activités particulièrement énergivores. En ce sens, le financement de nos activités de recherche par les AAP dont les crédits doivent être utilisés à termes va à l’encontre d’une économie vertueuse et économe par son manque de flexibilité, sans garantir la pérennisation et l’optimisation des financements alloués à nos activités de recherche, ce qui rend le mode de financement par AAP contre-productif.

Les campagnes de terrain, en particulier celles associées aux campagnes océanographiques et polaires, ont un impact carbone particulièrement élevé. Des gains importants peuvent être obtenus par rapport aux besoins de nos métiers et la mutualisation des campagnes, et une réflexion sur l’évolution des infrastructures et les investissements qu’elle implique est nécessaire à l’échelle nationale.

Les navires sont également de gros consommateurs d’hydrocarbures. La prospective d’évolution de la Flotte océanographique française (2023-2024) projette l’intégration des critères d’empreinte environnementale dans la définition du plan de renouvellement des moyens à la mer. La sobriété passera par le remplacement des navires actuels (dont le MD) par des navires bas carbone. À court et moyen termes, plusieurs stratégies peuvent être envisagées pour améliorer

le bilan environnemental des campagnes à la mer et réduire les émissions de CO₂: (1) une optimisation des campagnes en amont de la programmation par la FOF (valorisation des transits, organisation de campagnes multi-objectifs/multi-labos, campagnes communes à des domaines de recherche différents (géologie, biologie, océanographie, volcanologie, etc.), (2) une réduction de la vitesse des navires, (3) une amélioration de la gestion des navires au niveau européen qui permettrait de profiter de l’expertise en pointe de chaque pays partenaire (e.g. plateforme *in situ* MeBo du MARUM, carottage Calypso de la FOF), (4) une utilisation des enregistrements déjà acquis lors de campagnes précédentes. Une approche déjà en cours est de faciliter l’accès aux carottes existantes grâce à un recensement exhaustif et une meilleure traçabilité des carottes et des échantillons (cybercarothèque). Cette stratégie fait écho à une réflexion nécessaire et des actions concernant nos capacités de conservation.

En ce qui concerne les carottages glaciaires, les principaux laboratoires du groupe Carottes de glace France sont partenaires du projet labos 1.5 et l’IPEV s’est engagé dans une démarche de réduction de son empreinte carbone. Les principaux moyens à mettre en œuvre dans un premier temps seront une meilleure mutualisation des projets, une anticipation plus efficace des envois de matériels pour privilégier le fret bateau par rapport au fret avion, et une réduction de la vitesse de transit du navire ravitailleur Astrolabe. Des investissements seront nécessaires pour aller au-delà, tout en maintenant une activité scientifique en régions polaires. Des gains importants peuvent être obtenus en investissant dans la rénovation des bases antarctiques.

À l’échelle des laboratoires, la mise en place des cellules vertes participe également à plus de transparence vis-à-vis du grand public. Elle peut s’accompagner par la réutilisation programmée d’échantillons issus de campagnes d’échantillonnages précédentes et la mutualisation des moyens analytiques. En parallèle, les progrès technologiques ayant permis (1) la miniaturisation des appareils qui réduit le bilan carbone des achats et l’énergie nécessaire pour les faire fonctionner (un exemple iconique étant le remplacement des tandetrons par les MICADAS en ce qui concerne le radiocarbone), (2) l’augmentation du nombre d’échantillons mesurables permettant la multiplication des analyses et favorisant la mutualisation des instruments, et (3) le développement de nouvelles méthodes de paillasse utilisant la « chimie verte » (par exemple *via* l’utilisation de fluides supercritiques pour extraire les composés organiques de leur matrice en évitant ainsi l’utilisation de solvants organiques néfastes pour la santé et l’environnement et dont les processus de fabrication sont énergivores) tendent également à réduire l’impact des activités dans les laboratoires et doivent être encouragés.



SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Ce livre blanc présente un état des lieux et une prospective de la communauté des Paléoclimats & Paléoenvironnements (P&P). Il a été élaboré à partir des perspectives scientifiques des domaines concernés, d'une analyse bibliométrique et de différents indicateurs de financements et recrutements. Le contenu a fait l'objet, de consultations au travers d'un questionnaire, de réunions régionales et nationales. Il en ressort que l'activité P&P en France est soutenue et bénéficie de fortes interactions au niveau national et international. Des points de vigilances sont recensés et doivent être surveillés pour garder le haut niveau de production scientifique et la cohérence des recherches. Ils concernent l'ensemble du spectre des activités et couvrent tout autant les leaderships scientifiques, que les financements, l'organisation ou l'évolution des métiers. Les conclusions mettent en avant quatre actions nationales fédératrices qui permettront de relever les grands défis des prochaines années. Suivant les cas, elles sont propres aux thématiques P&P ou devront s'inscrire dans un cadre national plus large tout en les promouvant et en participant à l'effort national de réduction de l'empreinte carbone des activités. Il s'agit de :

- Un projet (ou programme) scientifique multidisciplinaire d'envergure faisant écho, sous l'angle des P&P, aux grands défis sociétaux liés à l'atténuation du changement climatique, la perte de la biodiversité, l'adaptation et les objectifs du développement durable, ainsi que différents facteurs de risque environnementaux.
- Un conservatoire national permettant la conservation et la systématisation du référencement des échantillons, de façon à valoriser les campagnes de terrain, renforcer les approches multidisciplinaires, garder les savoir-faire et pouvoir revisiter des données anciennes avec de nouvelles questions et méthodologies.
- Le développement et l'interopérabilité de bases de données ouvertes adaptées aux questions P&P et la mise en place d'une structuration permettant de renforcer la dynamique autour des comparaisons et intégrations modèles-données.
- Le développement de services multidisciplinaires pour diffuser les savoir-faire, les données et logiciels d'analyse et pour se doter d'interfaces permettant de renforcer les liens avec la société au travers d'actions de médiation scientifique ou de différents niveaux d'expertises.

Positionnements thématiques et à l'international

Les thèmes de recherche P&P en France fédèrent des équipes développant des approches multi- ou interdisciplinaires nécessaires pour comprendre l'évolution des paléoclimats et paléoenvironnements en lien avec l'évolution des écosystèmes, de la biodiversité ou des sociétés humaines. Ils mobilisent de nombreuses disciplines et métiers (physique, biologie, géochimie, géologie, histoire, archéologie...) au travers d'environ 700 personnes de 10 organismes de recherche et d'universités, principalement rattachées à des laboratoires mixtes reflétant les activités du CNRS-l'INSU (~54% océan-atmosphère, terre solide, surfaces et interfaces continentales), du CNRS-INEE (~40%) ou du CNRS-INSHS (~6%). Quatre grands thèmes principaux émergent actuellement: processus/forçages/rétroaction, impact des processus géologiques, cycles biogéochimiques et l'Homme et son environnement. Les études couvrent un large spectre d'échelles de temps, de la saison à plusieurs centaines de millions d'années, et d'espace, du site d'étude à l'échelle globale du système Terre. Elles mobilisent des campagnes de terrain, des analyses de laboratoire, de l'instrumentation innovante, de la modélisation et des comparaisons données-modèles. La dynamique des recherches se reflète dans la production d'un volume conséquent d'archives (ex. carottes sédimentaires ou glaciaires, roches ou concrétions, coquilles, etc.), de données, et une excellente production scientifique qui bénéficie de nombreuses interactions entre les laboratoires à l'échelle nationale.

Un vocabulaire commun et des approches partagées ou complémentaires soudent la communauté P&P en France. Cependant, un fort sentiment de perte de visibilité et d'attractivité est relevé. Il est attribué, entre autres, à divers silos structurels et thématiques déplorés par la quasi-totalité des sous-communautés impliquées (géochimistes, palynologues, géoarchéologues, physiciens, etc.). Deux cloisonnements sont mis en relief et nécessitent une attention

particulière: (1) Quaternaire versus Deep time (en lien avec présence/absence des sociétés humaines) et (2) spécialistes des processus de la période actuelle versus paléo.

Les activités P&P sont fortement ancrées et reconnues à l'international avec 80% des publications en cosignatures. Ces collaborations reflètent des leadership reconnus sur l'acquisition de données (e.g. missions internationales de forages, bases de données, etc.) et la modélisation (e.g. coordination du Paleoclimate Modeling Intercomparison Projet). Néanmoins, l'implication pour porter des projets d'envergure ou participer à des groupes de travail internationaux ou les rapports du GIEC ou de l'IPBES reste frileuse au regard d'autres pays comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni. Il est nécessaire de mieux promouvoir la visibilité internationale et d'apporter une attention collective et un accompagnement sur la présence dans les comités ou groupes de travail « de référence » pour la communauté.

Les résultats des recherches en P&P apportent des éclairages essentiels aux synthèses publiées dans les rapports du GIEC, et plus généralement à diverses questions liées aux risques climatiques ou environnementaux. Cependant, le potentiel de ces recherches vis-à-vis des questions sociétales n'est pas exploité à la hauteur où il pourrait l'être. Des liens plus étroits devraient être tissés pour répondre aux questions de biodiversité alimentant les rapports IPBES. Les interactions avec les SHS demandent à être encore renforcées. Il s'agit pour l'avenir de ne pas seulement considérer les résultats P&P comme une mise en perspective des changements actuels, mais comme une source d'information fondamentale pour anticiper les risques associés aux changements climatiques et environnementaux. Les études P&P permettent aussi de s'interroger sur les potentiels effets en cascade pouvant être induits par des mesures d'adaptation ou d'atténuation sur le fonctionnement du climat et des écosystèmes.

Grands axes de recherches et questions scientifiques pour les années à venir

Des inflexions préfigurent les orientations scientifiques des 10 à 20 prochaines années. Elles bénéficient des progrès permettant d'accroître la résolution temporelle, les chronologies, et de réaliser des intégrations plus systémiques entre climat, environnement, biodiversité et société. Quelle que soit la période de temps, les propositions mettent un accent sur la saisonnalité, la variabilité, les extrêmes, l'échelle régionale, les trajectoires, la vulnérabilité et la résilience. Les nouvelles directions de recherche favorisent des allers-retours entre les échelles locale et planétaire, ou des approches plus systémiques des fonctionnements et des interactions à l'échelle d'un territoire.

L'état des lieux fait néanmoins ressortir une hésitation constante entre les questions « actualistes » et les questions P&P, entre les questions pointues d'un domaine et le besoin d'interagir avec d'autres sur les questions scientifiques, ou encore entre les questions de pure curiosité scientifique et les questions apportant un éclairage sur les changements globaux en cours ou à venir. Une plus grande attention doit être portée aux adéquations entre les questions disciplinaires et multidisciplinaires et leurs calendriers respectifs pour garantir une synergie autour d'axes de recherche partagés à l'échelle nationale.

Un projet (ou programme) scientifique d'ampleur est proposé par la communauté P&P pour fédérer ses efforts. Les fortes interactions répertoriées entre les laboratoires concernés sont le garant de la faisabilité sous réserve que les moyens techniques et humains et l'organisation à l'échelle nationale permettent un accompagnement à la hauteur des ambitions. Les axes de recherche proposés permettront de consolider les interactions multidisciplinaires et les spécificités des activités P&P en France, tout en faisant ressortir les verrous et les grands agendas scientifiques. Le besoin de décloisonnements thématiques et organisationnels est pris en compte dans la présentation des questions scientifiques de façon à bénéficier de regards complémentaires et renforcer les interactions sur les différents sujets.

Ce projet est structuré en 3 axes thématiques: 1) Compréhension et intégration des processus couplés climat-environnement; 2) Forçages biotiques et abiotiques et seuils sur l'évolution des écosystèmes; 3) Lien Humain/Climat/Socio-écosystèmes. Il met en relief 4 défis ou verrous à relever qui sont propres aux activités P&P: (I) l'élaboration et l'amélioration des chronomètres, (II) la compréhension des processus de construction, d'enregistrement et de préservation du signal, (III) les intégrations d'échelles de temps ou d'espace, de données multiples ou de divers facteurs et (IV) le passé pour mieux caractériser les trajectoires naturelles, les perturbations anthropiques et les risques environnementaux.

Infrastructures, instrumentation et développements technologiques

La communauté P&P est très dépendante des moyens de terrain (national, international) ou du calcul. La collecte de données mobilise en particulier les moyens nationaux de carottages continentaux, marins, et glaciaire qui ont tous leurs spécificités de fonctionnement. Bien que les différents domaines bénéficient d'une structuration, les lourdeurs et difficultés pour accéder aux moyens nationaux et internationaux sont identifiées comme l'une des causes d'hésitation à porter des projets de grande envergure.

Les développements méthodologiques (prélèvements, analyses, instrumentation, modélisation, etc.) induits par les questions scientifiques sont un levier important en termes d'innovations. La qualité et la quantité des données produites sont remarquables, mais elles souffrent d'un manque d'harmonisation et ne sont pas encore pleinement exploitées dans les comparaisons données-modèles.

Les initiatives nationales structurantes en cours pour la gestion des échantillons ou la création de la cybercarothèque sont bien reçues par la communauté. Elles sont aussi source d'inquiétude sur les surcharges de travail et les surcoûts induits pour respecter les règles FAIR et garantir la traçabilité des échantillons de leur acquisition à leur exploitation scientifique (analyses, publications, etc.). Les réflexions et possibles solutions sont suffisamment matures pour recommander la mise en place d'un conservatoire national des échantillons faisant intervenir les stockages locaux et régionaux, et précisant les responsabilités et rôles des nombreux interlocuteurs concernés. Les réflexions rejoignent celles d'autres communautés et, en ce qui concerne les aspects analytiques, les contraintes du réseau RÉGEF.

De la même façon les bases de données ayant différents niveaux de spécificité, leur accessibilité et leur interopérabilité, y compris avec les bases internationales, sont actuellement sources d'inquiétude, de duplication des efforts et de

surcharge de travail. Des propositions et recommandations sont faites pour une intégration des contraintes des P&P dans l'infrastructure nationale DataTerra. Les données P&P couvrant une large gamme de disciplines, il faudra veiller à ce que les différentes approches et standards métier restent cohérents et compatibles. Les porteurs de ces recherches multidisciplinaires doivent pouvoir être force de proposition sans avoir à s'éparpiller entre de trop nombreux entrepôts et référentiels.

Les ressources nécessaires pour la modélisation des P&P sont en pleine expansion, liée au besoin de disposer de simulations longues pour accommoder les temps de réponse des réservoirs lents ou étudier les grandes transitions climatiques ou environnementales. Une vigilance doit être maintenue pour une bonne adéquation avec les standards internationaux promus dans l'IR CLIMERI-France. Il faudra également veiller à la bonne intégration entre les priorités P&P et celles des autres équipes de modélisation ou d'analyse (climat actuel, futur) pour éviter les duplications méthodologiques et de logiciels et permettre un renforcement des synergies entre les études des P&P du pré-quaternaire, du quaternaire, de l'actuel, et de leurs évolutions futures.

Les analyses P&P s'appuient sur des développements analytiques (géochimie, isotopes, etc.), ainsi que des développements instrumentaux dédiés à certaines mesures. Les grandes orientations concernent la miniaturisation des instruments, la précision analytique ou les incertitudes des mesures. Elles couvrent les besoins de calibration d'échantillons, de nouvelles méthodologies pour les datations ou une meilleure exploitation des archives, le déploiement de méthodes basées sur l'intelligence artificielle pour l'acquisition des données et le développement ou l'acquisition d'instruments plus sensibles et précis pour les analyses. Ces orientations s'accompagnent du besoin de préserver les savoir-faire et de rester à la pointe des développements technologiques.

Financements et recrutements

La communauté P&P en France est dynamique et obtient de nombreux financements. Les financements sur projets sont principalement des financements de proximité (labo, OSU, région), des programmes du CNRS, et de l'ANR. Les projets CNRS-INSU tendent à privilégier des approches basées sur la géochimie. L'analyse des projets ANR fait ressortir une part plus importante de projets sur les thématiques liant paléoclimat, paléoenvironnement, évolution et société par rapport à la part de ces thématiques qui émerge de l'analyse bibliométrique. On note une plus grande difficulté d'accéder aux financements européens de type Horizon Europe, et un taux de réussite encourageant à l'ERC. L'équilibre entre temps des montages des projets / taux de réussite est déterminant pour s'engager à porter un projet. Des soutiens récurrents restent essentiels. Il est nécessaire de mieux accompagner les réponses aux appels d'offre européens et internationaux et de faciliter la coordination de projets d'envergure (missions de terrain, projets scientifiques).

La multiplication des guichets, les besoins de co-financements pour les instruments accroissent les difficultés de coordination. Les financements en accordéon risquent d'engendrer des disparités avec un fonctionnement à plusieurs vitesses suivant les thématiques. Il est aussi nécessaire de rester vigilant à l'adéquation entre besoins de campagnes/missions terrain et besoins d'analyses, aux possibilités de financement des ETP non permanents (doc, postdoc, master), ainsi qu'aux sous-effectifs humains récurrents (RH, fonction support).

Certaines sous-communautés se considèrent fragiles. Une perte d'expertise, qui touche en particulier les métiers naturalistes, pourrait faire courir le risque à terme, de disposer d'analyses très pointues sur des objets (biologiques, minéraux...) mal identifiés. Les inquiétudes sur les ressources humaines concernent à la fois la perte de masse critique sur certains sujets et le besoin d'accroître les études multidisciplinaires et les interactions avec la société. La pérennisation des métiers techniques n'est pas assurée, avec de nombreux postes clefs assurés par des personnes en CDD pour des domaines ayant recourt à des appareils, des technologies et des systèmes informatiques de plus en plus élaborés.

Il est nécessaire de garantir l'emploi et de l'anticiper, en assurant la formation des futurs recrutés, l'attractivité des métiers, et l'employabilité des personnels formés. La grande diversité des formations actuelles tend à renforcer les silos thématiques identifiés. Il est nécessaire d'avoir une offre de formation favorisant les aspects scientifiques et méthodologiques transverses, dont une partie est également en adéquation avec les compétences devant se déployer dans différents secteurs d'activités pour traiter les questions de développement durable et déployer des solutions adaptées. L'enjeu est de permettre une évolution des métiers actuels vis à vis des nouvelles technologies et la science des données, tout en gardant un ancrage fort dans les disciplines sur lesquelles s'appuie le socle de connaissance P&P. Un second enjeu est de préparer des scientifiques mieux formés à la communication, la vulgarisation et la médiation scientifique.

Synergies au sein de la communauté française, animation de la recherche

La structuration de la communauté entre différents instituts du CNRS, différents organismes, qui se reflète également dans la multiplicité des guichets de recrutement ou de financement apparaît, suivant les cas, comme une force garantissant la diversité ou comme une faiblesse. Les remises en cause et les propositions pour faire évoluer l'organisation, le fonctionnement et l'animation de la communauté au niveau national reflètent le fait que la complexité du paysage et des structures ne répond pas aux besoins actuels. Elle est source de dispersion et propice au renforcement des silos identifiés. Une partie des constats n'est pas propre à la communauté P&P. Ils sont néanmoins exacerbés par l'aspect fortement multidisciplinaire des recherches. Un effort de coordination important doit être réalisé dans les années à venir au risque de l'éclatement de la communauté. Il est primordial de se doter des moyens de consolider les acquis et accompagner l'évolution des thématiques et des métiers pour aborder les nouvelles questions P&P de façon collective et innovante.

Il existe plusieurs initiatives (newsletter « paléo », journées « climats et impacts ») démontrant une volonté de la communauté de se structurer. Or, ces initiatives reposent sur la bonne volonté de quelques personnes. Ces initiatives ont besoin d'être pérennisées car elles remplissent des besoins de coordination et de circulation de l'information clairement identifiés. Cette coordination nationale doit être étendue au partage d'expérience sur les différents aspects d'expertise et de médiation scientifique.

Un effort a été fait pour regrouper des propositions dont certaines concernant les sections de recrutement, les vocabulaires des appels d'offres ou la façon d'entrevoir la science multidisciplinaire autour des questions scientifiques identifiées dans le livre blanc. Ces propositions sont largement partagées et devraient pouvoir être facilement mises en oeuvre.

Le renforcement de l'animation scientifique passe aussi par la mise en place de services multidisciplinaires pour la communauté P&P et pour favoriser les liens avec la société. Il est recommandé de dimensionner et mettre en place des services favorisant la diffusion des données, des produits évolués issus d'analyses ou de logiciels, ainsi que la formation permettant d'exploiter au mieux ces ressources. Ces services demandent de renforcer les aspects logistiques et de disposer de personnel dédié. Un autre enjeu est de disposer d'un espace de discussions pour faire évoluer les questions et pratiques. Au-delà des services permettant de fédérer les efforts, ces services doivent aussi permettre de renforcer les interactions avec la société, en partageant par exemple les initiatives de médiation scientifique et les supports de communication.

ÉLABORATION DU LIVRE BLANC

LE COMITÉ LIVRE BLANC ET LES DIFFÉRENTES ÉTAPES	21
Comité livre blanc et organisation	21
Méthode de travail	22
Tour de table et points saillants émanant de différentes perspectives	22
Phase de consultation sous forme de réunions régionales	23
Rapport d'étape du comité	23
Phase de consultation sous forme d'un questionnaire	23
Réunions nationales	23
Autres actions	24
GROUPES DE TRAVAIL	24
Recensement de la communauté	24
Étude bibliométrique	24
Financements	25
Formation et recrutements	26
International	26

L'élaboration de ce livre blanc s'est étalée sur trois années. Plusieurs facteurs expliquent ce temps de maturation. Le premier est lié à l'analyse d'une vaste gamme de questions ayant toutes leurs propres communautés et prospectives. Il ne s'agissait pas de refaire des prospectives existantes, mais de s'appuyer sur ces prospectives pour dégager les forces et faiblesses de la communauté, ainsi que les grands enjeux et verrous à lever pour les prochaines années. Il a aussi été jugé important de pouvoir caractériser les différentes activités de façon la plus objective possible. La récolte des informations et indicateurs nécessaires aux analyses quantifiées a mobilisé de nombreux interlocuteurs pour arriver à traiter les différents sujets. Enfin, les périodes COVID et post COVID ont fortement perturbé les agendas et la façon de travailler. En particulier, les aller-retours avec la communauté étaient au cœur de la démarche, mais ont demandé une constante adaptation aux conditions sanitaires et des modifications de calendrier.

Cette section rassemble la méthode de travail du comité livre blanc « paléoclimats et paléoenvironnement », les différentes étapes et difficultés rencontrées dans l'élaboration des indicateurs quantitatifs. Un site wiki rassemble les principaux éléments :

<https://livreblancpaleo.lsce.ipsl.fr/doku.php?id=home>

Le comité livre blanc et les différentes étapes

COMITÉ LIVRE BLANC ET ORGANISATION

Le comité livre blanc s'est mis en place en septembre 2020. Il rassemble des spécialistes couvrant les différentes facettes des thématiques « paléoclimats et paléoenvironnement » (Tableau 3.1). L'initiative ayant été lancée par des directeurs de laboratoires rattachés au domaine océan-atmosphère de l'INSU, la composition de départ est biaisée vers ces laboratoires qui sont néanmoins des laboratoires mixtes avec d'autres domaines ou instituts du CNRS ou d'autres organismes de recherche. Plusieurs membres font aussi l'interface avec les différents comités scientifiques des

instituts du CNRS. Le comité livre blanc a été vigilant à bien couvrir l'ensemble des activités « paléoclimats et paléoenvironnements »

Des membres du comité ont été identifiés comme référents pour animer les consultations régionales et servir d'interlocuteurs pour les laboratoires concernés. Le découpage en région suit les indicatifs téléphoniques (Tableau 3.2).

Des groupes de travail ont également été mis en place pour les analyses quantitatives, concernant la bibliométrie, les recrutements, la formation, les financements et l'international (Tableau 3.3).

Personnes issues des laboratoires ayant lancé l'initiative (il avait été demandé au départ 2 représentants par labo pour ces labos).

Franck Bassinot

franck.bassinot@lsce.ipsl.fr

Amaelle Landais

amaelle.landais@lsce.ipsl.fr

Bruno Wilhelm

*bruno.wilhelm@univ-grenoble-alpes.fr**

Patricia Martinerie

patricia.martinerie@univ-grenoble-alpes.fr

Bruno Turcq

bruno.turcq@ird.fr

Myriam Khodri

myriam.khodri@locean-ipsl.upmc.fr

Guillaume Leduc

leduc@cerege.fr

Doris Barboni

*barboni@cerege.fr**

Bruno Malaizé

bruno.malaize@u-bordeaux.fr

Frédérique Eynaud

frederique.eynaud@u-bordeaux.fr

Personnes assurant un lien avec les comités scientifiques INSU, INEE, INSHS ou internationaux

Brian Chase

brian.chase@umontpellier.fr (**Lien INQUA**)

Boris Vannière

boris.vanniere@cnr.fr (**Lien PAGES**)

Pascale Braconnot

pasb@lsce.ipsl.fr (**Chargée de mission Climat INSU et lien WCRP et Future Earth**)

Thibault de Garidel-Thoron

garidel@cerege.fr (**lien CSOA**)

Jérémy Jacob

jeremy.jacob@lsce.ipsl.fr (**lien CSSIC**)

Cécile Robin

cecile.robin@univ-rennes1.fr (**lien CSST**)

Sylvie Bourquin

sylvie.bourquin@univ-rennes1.fr (**lien CSST**)

Pierre-Henri Blard

pierre-henri.blard@univ-lorraine.fr

Fabien Arnaud

fabien.arnaud@univ-savoie.fr

Claire Delhon

claire.delhon@cepam.cnrs.fr

Jean-Renaud Boisserie

jean.renaud.boisserie@univ-poitiers.fr

Tableau 3.1 : liste des membres du comité livre blanc « paléoclimat et paléoenvironnement ».

Tableau 3.2 : contacts régionaux et dates des réunions régionales.

Zone

Région parisienne : Myriam Khodri et Jérémy Jacob
Sud-Est : Doris Barboni, Bruno Wilhelm et Guillaume Leduc
Sud-Ouest : Frédérique Eynaud et Bruno Malaizé
Nord-Ouest : Sylvie Bourquin et Cécile Robin
Nord-Est : Pierre-Henri Blard et Fabien Arnaud

Dates réunions régionales

14 avril 2021 - 10 septembre 2021 - 12 avril 2022
5 juillet 2021 - 13 avril 2022
7 juillet 2021 - 13 avril 2022
9 juillet 2021 - 27 septembre 2021 - 22 mars 2022
10 septembre 2021 - 27 avril 2022

Analyse bibliométrique	Recensement	Financements	Formation	International
Franck Bassinot, Bruno Wilhelm	Bruno Turcq, Cécile Robin, Franck Bassinot, Thibault de Garidel-Thoron, Jérémy Jacob, Myriam Khodri, Pierre-Henri Blard	Sylvie Bourquin, Cécile Robin, Doris Barboni, Fredérique Eynaud, Brian Chase	Bruno Malaizé Cécile Robin	Boris Vannière, Bruno Wilhelm, Brian Chase

Tableau 3.3 : Groupes de travail mis en place pour élaborer les indicateurs quantitatifs.

MÉTHODE DE TRAVAIL

L'élaboration du livre blanc a mobilisé la communauté sous différentes formes. La méthode de travail, les différentes étapes, les choix de support de consultation et de communication sont exposés ci-dessous.

Tour de table et points saillants émanant de différentes prospectives

De novembre 2020 à mai 2021, des cycles de réunions du comité ont permis de dresser le panorama des recherches paléoclimats et paléoenvironnements en France *via* le prisme des différents rapports et prospectives existants. Le domaine couvert étant très large, cette phase était importante pour s'approprier les différentes questions qu'elles soient d'ordres scientifiques ou faisant référence aux moyens (infrastructure, financements, humains...). Le tableau 3.4 présente les différents sujets abordés au cours de ce cycle.

En parallèle et tout au long de ce processus, des discussions et récoltes de données concernant les thématiques suivantes ont été engagées :

- état des lieux, bilan et cartographie du champ couvert par le livre blanc selon les approches des différents métiers, thématiques de recherche, un bilan sur la bibliométrie ainsi qu'un bilan sur les enseignements au sein des universités ;
- discussions sur les grandes questions scientifiques et les verrous, les grands enjeux au sein et entre les communautés concernées ;
- discussions sur les infrastructures associées aux thématiques de recherche, instruments/nouvelles technologies ;
- administration de la recherche : financements, recrutements, etc.

Pour ces différents sujets, un enjeu était de croiser plusieurs approches permettant de mettre des informations qualitatives ou des ressentis au regard d'éléments objectifs obtenus à partir des analyses quantitatives ou de l'analyse bibliométrique.

PREMIÈRE ÉTAPE : NOVEMBRE 2020 À MAI 2021

Analyse et synthèse des éléments figurant dans les différentes prospectives selon quatre cycles de réunions

Premier cycle de réunions : récapitulatif des réunions de la prospective INSU

Série de réunions récapitulant les points saillants des présentations faites, défi par défi, lors de la dernière prospective INSU. Ce tour de table s'est terminé en janvier 2021.

Second cycle de réunions : récapitulatif des autres prospectives récentes

Présentations et discussions des autres prospectives ayant eu lieu récemment à l'échelle nationale, et en particulier : prospectives INEE, OA, CSOA, SIC. Ce tour de table s'est terminé en janvier 2021.

Troisième cycle de réunions : bilan des infrastructures de recherche

Dans ce cycle de réunions sur les infrastructures nous avons abordé les points suivants :

- Rapport sur les moyens de sondages et carottages continentaux en France,
- Moyens de carottages en glaciologie,
- Moyens de carottages marins,
- Moyens de forages marins, en lien avec IODP et ECORD,
- Moyens de forages continentaux, en lien avec ICDP,
- Parc analytique français et réseau REGEF,
- Moyens de calcul

Quatrième cycle de réunions : organisation de la recherche aux échelles nationale et internationale

Un bilan de la recherche en France et au sein de la communauté internationale a été abordé à travers le prisme des programmes et organisations suivants : AFEQ/INQUA, PAGES/FutureEarth, CMIP/PMIP & lien avec IPCC, WCRP, et s'est appuyé également sur l'analyse bibliométrique

Phase de consultation sous forme de réunions régionales

A l'issue de ce cycle, des phases de consultation ont été engagées avec la communauté sous forme de réunions régionales. L'objectif était d'aller au plus proche des collègues pour les impliquer dans les réflexions autour de ce livre blanc. Cinq régions ont été identifiées de façon à volontairement favoriser les échanges entre chercheurs travaillant sur des thématiques, des échelles de temps et des approches variées. Cette étape s'est déroulée entre avril 2021 et septembre 2022 (Tableau 3.2).

La première série de réunions régionales avait pour objectif d'informer la communauté des travaux et conclusions issus de la première phase de réunions du comité. Environ 150 collègues ont participé à ces réunions. Les échanges ont permis de croiser les avis et les éléments de discussion rassemblés en annexe.

Le deuxième cycle de réunions avait comme objectif de recueillir des éléments de perspectives de façon à identifier les grands axes de recherche, les attentes et besoins pour les activités futures. Une centaine de collègues a participé à ces consultations. Les principaux éléments de discussion sont rassemblés en annexe.

Rapport d'étape du comité

A l'issue de cette phase de consultations régionales, la production d'un rapport d'étape a permis au comité de partager les travaux en cours et les conclusions de façon très large. Ce rapport d'étape identifie les éléments à approfondir pour l'élaboration du livre blanc lui-même. Il a été un vecteur d'interaction avec la communauté et différentes instances.

Ce rapport d'étape est disponible sur le site wiki du comité : <https://sharebox.lsce.ipsl.fr/index.php/s/ZWSwhlDQkc7jr9f> Ce rapport fait ressortir les grandes orientations scientifiques et plusieurs points d'attention sur l'organisation de la communauté, les moyens, les recrutements ou les financements. Il fait aussi état d'un besoin de consolidation, en particulier pour se projeter collectivement dans des grandes questions qui justifieront des nouvelles structurations et de nouveaux moyens pour les 10, 20, 25 ans à venir.

Phase de consultation sous forme d'un questionnaire

Un questionnaire a ensuite été élaboré pour permettre à un maximum de collègues de s'exprimer et de vérifier s'il y avait ou non convergence entre les premières conclusions du comité et leurs attentes. Il avait ainsi comme objectifs de :

- compléter le recensement de la communauté ;
- dresser le portrait de la communauté (identité) ;
- impliquer un maximum d'interlocuteurs dans l'exercice

Livre Blanc ;

- identifier de nouvelles idées.

Le questionnaire a été adressé à la communauté le 3 mars 2022 et ouvert jusqu'à fin avril. Plusieurs questions faisaient référence au rapport d'étape. Les grandes rubriques brosaient des questions couvrant successivement le travail de la personne ou du groupe répondant, les thématiques, les moyens, les nouveaux enjeux, les bases de données et la science ouverte. Les questions sont reportées en annexe du rapport du comité.

85 réponses individuelles ou collectives ont été obtenues. L'exploitation du questionnaire a été réalisée par les membres du Comité, avec une répartition des tâches par section et une synthèse collective présentée lors de la réunion nationale du 11 mai 2022.

Réunions nationales

Deux réunions nationales, l'une en distanciel en raison des conditions sanitaires et l'autre en présentiel ont été organisées en 2022 pour affiner les conclusions et les pistes de prospective.

La première réunion s'est tenue les 11 et 12 mai 2022 – en distanciel¹. Elle avait pour objectif de faire une première restitution des travaux du comité sur l'état des lieux et les avancées des groupes de travail sur les éléments quantitatifs. La seconde partie était spécifiquement dédiée aux nouveaux enjeux autour de la collecte et conservation des échantillons, la modélisation, l'instrumentation, les données et la science ouverte. Des groupes de travail ont été organisés pour (1) approfondir les questions scientifiques, et (2) s'interroger sur les besoins d'infrastructure, les bases de données et leur interopérabilité, et la façon de remplir les exigences de la science ouverte. Environ 200 personnes ont participé à cette réunion.

La seconde réunion s'est tenue en présentiel les 20 et 21 octobre 2022 à la Cité Universitaire Internationale, Paris². Ces journées intitulées « Quel avenir pour les recherches Paléoclimats et Paléoenvironnements en France ? » avaient pour objectif de renforcer les éléments scientifiques de la prospective. La trame du projet scientifique proposée dans le Livre Blanc a été présentée et discutée. Une session a également permis de débattre des questions de société et les aspects sur lesquels l'apport des paléoclimats et paléoenvironnements pouvaient et devaient être renforcés. Environ 80 collègues ont participé à ces journées en présentiel, et plusieurs centaines de participants ont également pu suivre les échanges en distanciel (avec 625 inscrits au total).

1- https://livreblancpaleo.lsce.ipsl.fr/doku.php?id=info:reunions#journees_des_11_et_12_mai_2022

2- https://livreblancpaleo.lsce.ipsl.fr/doku.php?id=info:reunions#colloque_de_restitution_du_livre_blanc_paleoclimats_et_paleoenvironnements20_et_21_octobre_2022

Autres actions

Le comité a également pris soin d'impliquer le plus possible la communauté dès le lancement des réflexions sur le Livre Blanc. Un premier échange en distanciel avec la communauté « paléo » a eu lieu dès le 25 novembre 2020, lors d'une table ronde organisée dans le cadre des journées « Climat et Impacts ».

Plusieurs actions de communication ont permis de diffuser l'information à l'ensemble de la communauté. On peut noter en particulier les lettres d'information, dont les actualités de l'INSU du 12 mai 2022 relayées auprès des autres instituts du CNRS. Des pages wiki ont été mises en place pour suivre l'actualité de l'élaboration du Livre Blanc et, pour les membres du comité, comme outil de travail colla-

boratif pour le suivi des différentes actions et l'écriture du Livre Blanc.

Des présentations sur les avancées du Livre Blanc ont également été faites auprès des comités scientifiques des domaines OA, SIC, et TS de l'INSU et de l'INEE.

Notons aussi que le comité a fait une journée de retraite en distanciel avec l'intervention de Vincent Boly et Raphaël Bary de l'université de Lorraine, spécialistes des processus d'innovation. Cette journée a permis de s'interroger sur les méthodes de co-construction entre différents acteurs permettant de faire émerger la créativité. Cette intervention a été bénéfique pour mieux cerner les contours du travail du comité et trouver les ressorts permettant de se projeter au-delà des temps de prospective à court ou moyen terme.

Groupes de travail

Les groupes de travail du comité ont rassemblé de nombreux indicateurs quantitatifs en mobilisant de nombreuses structures et personnes ressources. La méthode de travail et les difficultés rencontrées sont exposées pour chacun d'eux ci-dessous. Ces informations permettent de bien mettre en contexte les résultats sur lesquels s'appuient les analyses du comité.

RECENSEMENT DE LA COMMUNAUTÉ

Le recensement de la communauté fut établi en premier lieu par l'agrégation de listings disponibles dans différentes sous-communautés : les répondants au questionnaire (cf. infra) ou participants aux réunions régionales et nationales, la liste de diffusion de la lettre « Paléo », les listes de participants à des conférences nationales (Climat et Impacts, par exemple), les résultats de concours dans les Bulletins Officiels du CNRS ou sur le site de François-Xavier Coudert, les rapports de conjoncture des sections et CID du CNRS, les informations fournies par les département RH des instituts concernés, dans quelques cas des réponses par laboratoires, complétés par la bibliographie.

Les rubriques (dates de recrutement ou de départ, établissement, section CNU/CNRS...) ont été renseignées soit par sollicitation directe des collègues par email, par exploration des contenus disponibles sur internet (pages LinkedIn, pages personnelles...), par consultation de Labintel, etc.

La dispersion de la communauté dans plusieurs établissements, ajoutée à l'absence d'une gestion thématique des personnels ou à l'absence de centralisation nationale des RH (cas des universités) n'a pas permis d'obtenir un retour efficace de la part des établissements sollicités. Aussi, et malgré la quantité de données récoltées, celles-ci restent incomplètes. Comme en paléosciences, les données les plus anciennes sont les plus fragmentaires. Il est par ailleurs regrettable de ne pas conserver la mémoire de ceux qui ont construit l'histoire de la communauté Paléo.

Les résultats sont confrontés à des données publiques comme le site « Soundofscience », data.gouv.fr ou data.enseignementsup-recherche.gouv.fr. Les données ne permettent pas une étude prévisionnelle des effectifs à 10, 20, 30 ans.

ÉTUDE BIBLIOMÉTRIQUE

Une étude bibliométrique du corpus de publications « paléoclimats et paléoenvironnements » a été réalisée en collaboration avec l'INIST. La recherche a été effectuée pour les années de publication 2000-2020 dans plusieurs bases du Web of Science™ Core Collection de Clarivate Analytics par le biais de la plateforme Web of Science (WoS). L'objectif était d'apporter des éléments factuels complémentaires permettant :

- de recenser les chercheurs et les instituts/laboratoires im-

- pliés en France;
- de cartographier les collaborations nationales, notamment inter-instituts (INSU, INSHS, INEE), et les collaborations internationales;
- d'identifier les thématiques, outils, périodes de temps étudiées et les zones d'études principales;
- d'apprécier l'importance de la communauté française sur certain(e)s thématiques / outils / périodes;
- de faire, dans la mesure du possible, le point sur les financements / financeurs / infrastructures de recherche.

Les analyses ont été réalisées à l'aide de plusieurs ensembles de combinaisons de termes et mots-clés représentant les différentes thématiques relatives aux paléoclimats et au paléoenvironnements, ainsi qu'à l'aide du thésaurus de paléoclimatologie réalisé par le service Terminologie de l'INIST.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées pour l'élaboration du corpus de références. Une vaste gamme de mots clés a été fournie pour s'assurer que les différentes thématiques soient bien répertoriées. En raison de l'éventail large couvert par ces mots clés, la base initiale a intégré des publications en dehors des thématiques du livre blanc. Au départ 17590 publications ont été recensées, dont 8690 se sont avérées hors champ d'investigation. La base de données nettoyée compte 8900 publications. Les bases de données utilisées, bien que reconnues internationalement comme références, présentent cependant certains biais notamment pour des domaines où la couverture est réduite. Aussi cette étude bibliométrique n'a pas pour but de recenser de façon exhaustive les publications des entités de recherche mais de donner, à partir d'indicateurs bibliométriques, des ordres de grandeur, des éléments de comparaison et des tendances.

Les résultats de cette analyse bibliométrique sont distribués dans les différentes sections de l'état des lieux (section 4) pour étayer les analyses au regard des autres sources d'information utilisées.

FINANCEMENTS

L'objectif du travail de synthèse sur les financements était de mettre en regard l'historique des soutiens financiers obtenus par la communauté « Paléoclimats et Paléoenvironnements » et l'évolution des sources de financement sur les dernières années, afin d'identifier les possibles difficultés de la communauté à pérenniser ses ambitions scientifiques. Le groupe de travail a ciblé son effort d'analyses sur les appels d'offres dont les résultats étaient accessibles et suffisamment détaillés pour permettre une étude à fine granularité des thématiques intrinsèques à la communauté « Paléo ». De fait, les synthèses ont été finalisées pour les AO nationaux des actions INSU (TelluS-SYSTER, TelluS-INTERRVIE, LEFE-IMAGO/CYBER) et INEE, qui représentent la majorité des AO nationaux dans lesquels la communauté émerge.

En ce qui concerne l'analyse des appels d'offres nationaux de l'ANR, l'obtention des résultats a été plus difficile. Un travail détaillé vient d'être publié par l'ANR pour les thématiques « Paléoenvironnements et sociétés humaines »³. Ce cahier, coordonné par Matthieu Ghilardi et Mélanie Pateau regroupe les informations de 97 projets et fait une analyse des financements et de l'évolution des thématiques depuis 2005. Néanmoins l'objectif est légèrement différent de celui de ce livre blanc et ne couvre qu'une partie des thématiques P&P. L'accès aux informations nécessaires à une étude exhaustive des financements ne peut se faire que par demande d'extraction exclusive par les services de l'ANR eux-mêmes, qui ont donné une réponse favorable. Ce travail complémentaire a finalement été inscrit tardivement dans l'élaboration du livre blanc. Une première extraction des projets financés a été réalisée à partir des mots clefs ayant servi pour l'étude bibliométrique. Comme pour l'analyse bibliométrique, ces mots clefs identifient des projets hors périmètre du livre blanc, ce qui a demandé de regarder plus finement les contenus pour sélectionner les projets. Des manques ont aussi été relevés et partiellement comblés. Une analyse rapide permet de dire que ces manques affectent toutes les types d'étude relevant de P&P et ne semble pas affecter une partie de la communauté plus qu'un autre. Au total 150 projets ont été identifiés comme faisant partie du cœur des activités P&P. L'analyse ne considère que les nombres de projets par grandes thématiques et ne contient pas les informations sur les montants alloués aux projets, ces éléments n'ayant pas été rassemblés.

À l'international, les synthèses ont été réalisées pour les projets ERC et pour les programmes de forages IODP et ICDP. Certaines sources de financements significatives (Europe hors ERC) ont été analysées de manière partielle. Les données ont été fournies par la cellule internationale de l'INSU. Elles rassemblent les projets ayant un partenaire CNRS relevant de l'INSU. Le recensement est absent pour les porteurs de projets universitaires sans autre partenaire CNRS dans le consortium. Dans son analyse, le groupe de travail a parfois été confronté à une difficulté de cohérence des périodes de recul considérées (problème d'homogénéité des résultats accessibles par AO). Cependant celle-ci couvre à minima les cinq dernières années.

Un bémol à la pertinence de nos synthèses ressort de la non connaissance des taux de succès aux AO respectifs (i.e. ratio nb. projets soumis vs nb. projets financés) qui mériteraient d'être connus pour une meilleure estimation des efforts réellement engagés par la communauté Paléo.

3- « Paléoenvironnements et sociétés humaines », les cahiers de l'ANR, n°15, mai 2023

FORMATION ET RECRUTEMENTS

Le groupe de travail 'Formation' s'est appuyé tout d'abord sur les résultats d'une enquête préalable menée pour les prospectives 'Terre Solide' (pour les masters) et sur un bilan national effectué pour la revue 'Géologues' sur le portail national d'entrée en licence 'Géosciences'. Le groupe a ensuite complété les informations par un questionnaire d'enquête envoyé aux porteurs de master et de licence, identifiés par l'intermédiaire des sites internet des différentes formations existantes dans les Universités du territoire national.

Le groupe s'est ensuite concentré sur ces retours d'enquêtes en identifiant plus spécifiquement :

- les différentes thématiques spécifiques des universités (disciplines, échelle de temps);
- les formations à visée fondamentale ou appliquée;
- les inscriptions en thèse répertoriées dans les différentes Écoles Doctorales (ED) (celles ayant répondu).

Les difficultés auxquelles a été confronté ce groupe de travail sont de plusieurs types. En particulier, la représentativité statistique des résultats dépendait des retours obtenus aux enquêtes. Le taux de retour a été relativement faible (environ 25% : soit 6 universités/ED sur 20 contactées). Les conclusions sont donc automatiquement à prendre avec ce filtre en mémoire.

Enfin, les analyses menées se sont essentiellement concentrées sur les cursus universitaires. Depuis quelques années, plusieurs écoles d'ingénieur ayant des passerelles avec nos différents laboratoires proposent des stages à leurs étudiant(e)s pouvant les mener à spécialiser leur thématique autour des paléosciences. Le groupe de travail a eu des difficultés à obtenir une vision globale de la répartition des origines des jeunes chercheurs nouvellement recrutés (combien ont suivi un cursus universitaire vs combien proviennent d'écoles d'ingénieur vs combien ont fait des études à l'étranger).

La plupart des résultats sont présentés à la fois sous forme de cartes de répartition géographique (nationale) mais aussi sous forme de répartitions statistiques (camemberts) des items présentés plus haut (échelles de temps couvertes- formations théoriques/appliquées- répartitions au sein des masters/ doctorats).

L'évolution des recrutements s'appuie sur les éléments collectés dans le cadre du recensement de la communauté (voir point 3.3.1.).

INTERNATIONAL

Les recherches dans le domaine des paléoclimats et paléoenvironnements sont réalisées dans un contexte très international. Les réseaux de compétences et d'expertises dans bien des domaines des paléoclimats et paléoenvironnements seraient en effet trop petits s'ils devaient se limiter

aux frontières nationales. D'autre part, les sujets et terrains d'études se répartissent bien au-delà de nos territoires nationaux et sont le plus souvent étudiés en partenariat avec les acteurs locaux et/ou régionaux. Enfin, les innovations thématiques, méthodologiques et technologiques faites au sein de la communauté nationale et à l'étranger intéressent mutuellement chaque partie et les bénéfices de ces échanges sont un des moyens de donner à la communauté française, somme toute relativement petite, un potentiel de progression plus rapide. Bien que la communauté française soit fortement impliquée dans des grands projets, campagnes ou différents comités internationaux, l'objectif principal du livre blanc est d'identifier les aspects à renforcer ou à consolider.

Pour cela, les analyses ont porté d'une part (1) sur l'accès aux infrastructures de recherche pour les grands forages (marins, terrestres et glaciaires) dont les résultats sont présentés dans la section 4.1.4, et d'autre part (2) sur les financements associés (les financements européens révélateurs de certaines collaborations ont été considérés par le groupe financement et rapportés dans la section 4.4.1).

La communauté internationale est structurée par des sociétés savantes ou les grands programmes des Nations Unies. Afin d'évaluer l'implication de l'ensemble de la communauté française et les prises de responsabilités au niveau international, sa participation à deux grands réseaux a été analysée : (1) l'International union for quaternary research (INQUA, <https://www.inqua.org/>), qui est une association de métiers presque centenaire (depuis 1928) ; et (2) Past global changes (PAGES, <https://pastglobalchanges.org/>), qui relève du programme international Future Earth. En complément, le comité a aussi étudié l'implication française au sein du Paleoclimate modeling intercomparison project (PMIP, <https://pmip.lsce.ipsl.fr/>). Ce projet sous l'égide de PAGES et du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) est coordonné au LSCE depuis son lancement en 1991 et a, à ce titre, un statut particulier pour la communauté de modélisation nationale.

LIVRE BLANC

PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS

A

État des lieux



A

État des lieux

SOMMAIRE

A1. LES RECHERCHES « PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS » EN FRANCE	31
A2. INFRASTRUCTURES NATIONALES ET INTERNATIONALES MOBILISÉES	45
A3. PRINCIPALES ÉVOLUTIONS THÉMATIQUES DES DERNIÈRES ANNÉES ET OPPORTUNITÉS	53
A4. FINANCEMENTS DES PROJETS SUR LES 20 DERNIÈRES ANNÉES	59
A5. FORMATION ET RECRUTEMENTS SUR LES 20 DERNIÈRES ANNÉES	67



A1. Les recherches « Paléoclimats et Paléoenvironnements » en France

Le livre blanc « Paléoclimats & paléoenvironnements » couvre un large spectre de thématiques et d'approches qui se déclinent dans des équipes et laboratoires en forte interaction. Les différentes consultations et enquêtes permettent d'en préciser les contours et d'en dresser un état des lieux.

A 1.1 IDENTITÉ DE LA COMMUNAUTÉ « PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS »

Il est difficile de donner une définition stricte du périmètre couvert par ce livre blanc. Néanmoins, la notion de communauté « Paléoclimats et paléoenvironnements », P&P dans la suite, ressort de nombreux échanges. La question qui s'est alors imposée est : qu'est-ce qui définit une communauté, participe à son identité et la singularise d'autres communautés ? L'analyse des réponses au questionnaire (Figure A 1.1) fournit quelques éléments de réflexion.

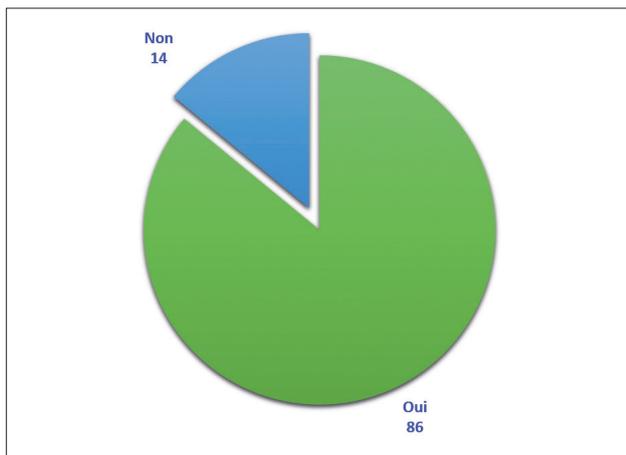


Figure A 1.1 – Réponses du questionnaire à l'affirmation : activités qui peuvent se définir par des pratiques communes.

La communauté scientifique P&P partage d'abord un objectif commun : augmenter les connaissances sur le passé de la Terre et de ses occupants autour de questionnements partagés. Aussi étudie-t-elle l'évolution des systèmes terrestres, leurs différents états, leurs dynamiques, en s'appuyant sur des allers-retours constants entre le passé et le présent et avec la nécessité impérative d'établir des cadres chronologiques contraints et de prendre en compte l'état de conservation des signaux/taphonomie. Elle partage des éléments de langage communs et un vocabulaire spécifique. Elle se définit aussi par des approches et pratiques communes en assumant pleinement une dimension pluridisciplinaire.

La communauté P&P est également riche de sa diversité. Ces sous-ensembles expliquent ou résultent des différentes

disciplines et structures auxquelles les membres de la communauté s'identifient plus spécifiquement au sein de la communauté P&P dans son ensemble.

Une image de cette richesse et diversité ressort de l'analyse bibliométrique qui permet de caractériser les études P&P menées en France en se basant sur les mots figurant dans les titres et résumés des publications. (Figure A 1.2). Cette analyse indique que les recherches couvrent toute la gamme de périodes temporelles, depuis le Précambrien jusqu'à la période instrumentale. Elle présente une forte imbrication avec les questions liées à la paléobiosphère.

Les mots-clés de la figure A 1.2 s'organisent en plusieurs ensembles de couleurs. Le vert est associé aux périodes les plus anciennes et à certains outils/approches privilégiés pour leur étude (e.g. la biostratigraphie - les unités stratigraphiques de base étant établies grâce aux contenus faunistiques/floristiques). Cet ensemble vert fait face sur l'axe horizontal à un ensemble bleu qui matérialise les périodes très récentes (« holocène », « history ») dans lequel les aspects reconstruction des climats et impacts de l'Homme sont prédominants. L'ensemble vert anis, en haut du graphique, est caractérisé par l'occurrence des termes « paleoenvironments » et « paleoecology », avec un net tropisme continental, tandis que la zone turquoise regroupe des termes associés à l'environnement humain et à son évolution. La zone rouge, en bas du graphique, est articulée autour du mot « record » et met en exergue des archives naturelles (« ice cores »), certains outils (e.g. « isotopes », « geochemistry ») et présente un tropisme océanique marqué (e.g. « sea level », « foraminifera »).

La segmentation entre périodes très récentes (bleu) et anciennes (vert) matérialise le type de découpage qui existe entre les sections 19 et 18 du CNRS, tandis que la section 31 semble se distribuer entre les ensembles turquoise et vert anis. Au-delà de cette segmentation de premier ordre, la figure A 1.2 fait aussi ressortir les nombreuses passerelles et interactions entre ces ensembles. Le barycentre de la figure regroupe les thématiques majeures qui rassemblent la communauté (e.g. « climate », « environment », « evolution »). Il met en exergue l'aspect fondamental joué par la chronologie à toutes les échelles de temps et pour tous les environnements (« dating », « stratigraphy », « chronology », « geochronology »).

Une mesure du dynamisme de la communauté paléo au sens large est donnée par la croissance des publications sur 20 ans (Fig. A 1.3 a). Quelques années ont donné lieu à des volumes de publications plus élevés que la tendance moyenne. Pour 2013, on peut associer ce volume de publi-

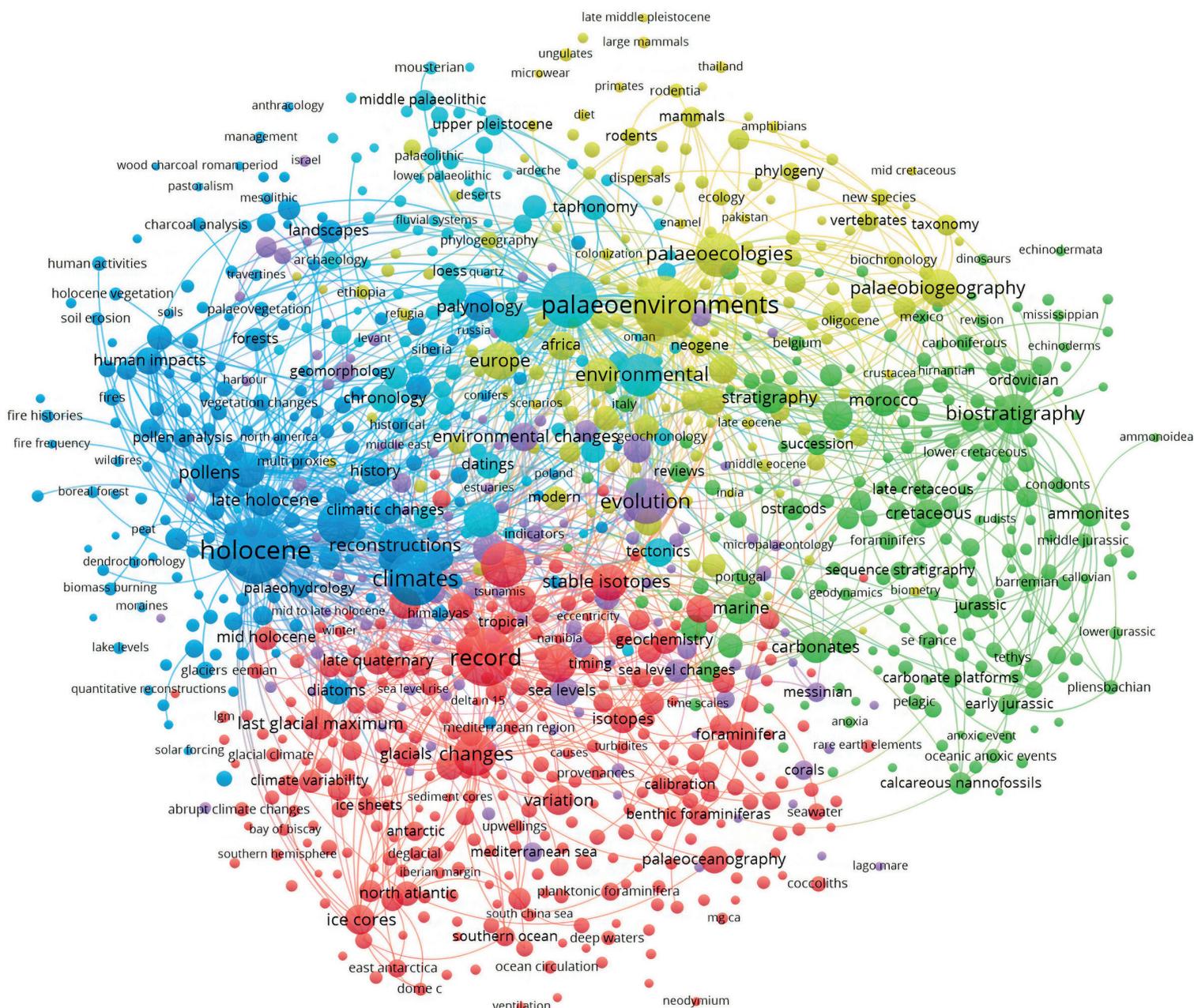
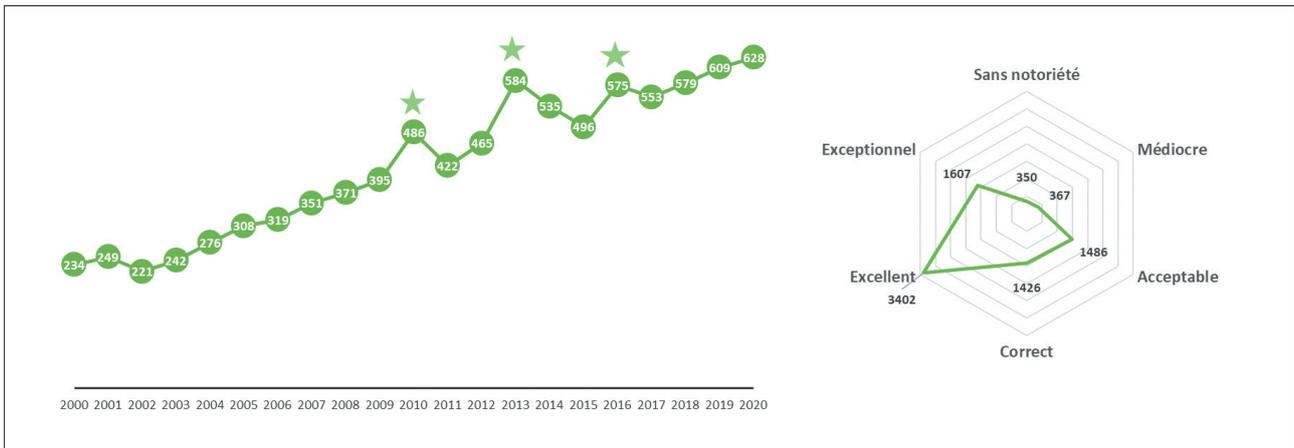


Figure A.1.2 – Les thématiques paléoclimats et paléoenvironnements en France vues par le prisme de l'analyse bibliométrique et les mots clés des titres et des résumés des publications.

cations au rapport du GIEC et la préparation en amont de nouvelles publications devant paraître avant la date limite pour pouvoir être considérées dans le corpus de bibliographie analysé par les auteurs du rapport. En se basant sur ces indices de notoriété, on constate que plus de 57% des publications de P&P sont regroupés dans les deux classes supérieures des journaux à forts facteurs d'impact (notées « excellente » et « exceptionnelle », Fig. A.1.3). Seuls 10% des publications sont regroupées dans les classes « médiocre » ou « sans notoriété » (i.e. revues qui ne sont pas recensées

dans la base WoS). Ces résultats objectifs montrent bien l'excellence de la communauté française dans le domaine des recherches en paléoclimat et paléoenvironnement.

Une étude plus fine basée sur des groupements de mots clés spécifiques à certaines disciplines montre que le nombre de publications annuelles a augmenté à un taux à peu près similaire de +3,2%/an sur 20 ans pour les principaux champs disciplinaires des P&P.



La figure A.1.4 présente les principaux journaux dans lesquels publie la communauté P&P et reflète bien la diversité des mots-clés de la figure A.1.2. Cette figure permet d'apprécier également la proportion d'articles parus dans des revues à fort facteur d'impact.

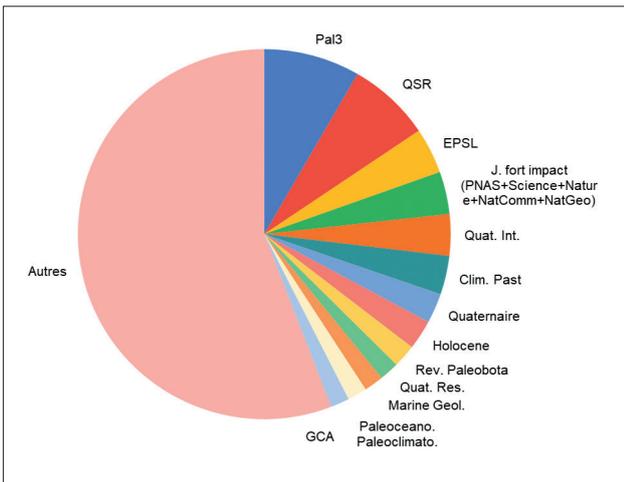


Figure A.1.4 – Revues à comité de lecture dans lesquels la communauté P&P française publie. Seuls les journaux avec > 150 publications sur la période 2000-2020 ont été différenciés. On notera en particulier 1- les trois journaux les plus plébiscités : *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology* (index factor 3.6) ; *Quaternary Science Reviews* (IF 4.5) et *Earth and Planetary Science Letters* (IF 5.8), et 2- l'importance des publications dans les journaux à très fort impact ont été regroupés (*Nature*, *Science*, *PNAS*). Noter l'émergence de la revue *Climate of the Past*, jeune revue européenne créée en 2005 en accès libre.

Figure A.1.3 – a) Évolution du nombre de publications par an entre 2000 et 2020. Les années marquées d'une étoile se détachent de l'augmentation moyenne de l'ensemble des publications et b) indice de notoriété des publications pour l'ensemble de la période. L'indice de notoriété est un indice développé par l'INRAE. Il est construit à partir d'une méthode d'analyse et de lecture du facteur d'impact qui permet de comparer les sources entre elles, en s'appuyant sur une méthode statistique descriptive de distribution de fréquences.

A.1.2 EFFECTIFS RECENSÉS ET RÉPARTITIONS DES LABORATOIRES

Le recensement effectué permet d'identifier 819 personnels de recherche permanents qui considèrent avoir, ou avoir eu, une activité en lien avec les P&P en France entre 1961 et 2022 (les effectifs du personnel en appui à la recherche n'ont pas été comptabilisés). L'effectif actuel est d'environ 700 personnes. L'essentiel des effectifs (~75%) est affecté au CNRS ou dans les universités (Figure A.1.5). Les 25% restants relèvent d'établissements publics (EPST ou EPIC) comme le CEA, le MNHN, l'IRD, l'Ifremer, l'EPHE ou le BRGM, mais aussi du Ministère de la Culture, de l'INRAP, des Mines-Paris-Tech, des entreprises privées et des collectivités.

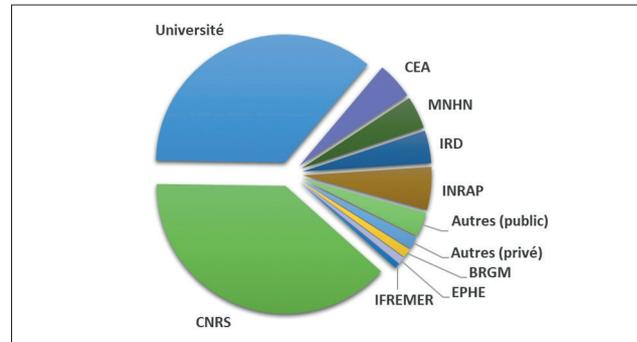


Figure A.1.5 – Répartition des personnels P&P dans les principaux organismes de recherche et autres établissements.

Pour 243 chercheurs pour lesquels nous disposons de toutes les informations, la répartition par section/CID du CNRS et des sections du CNU s'établit de la manière suivante :

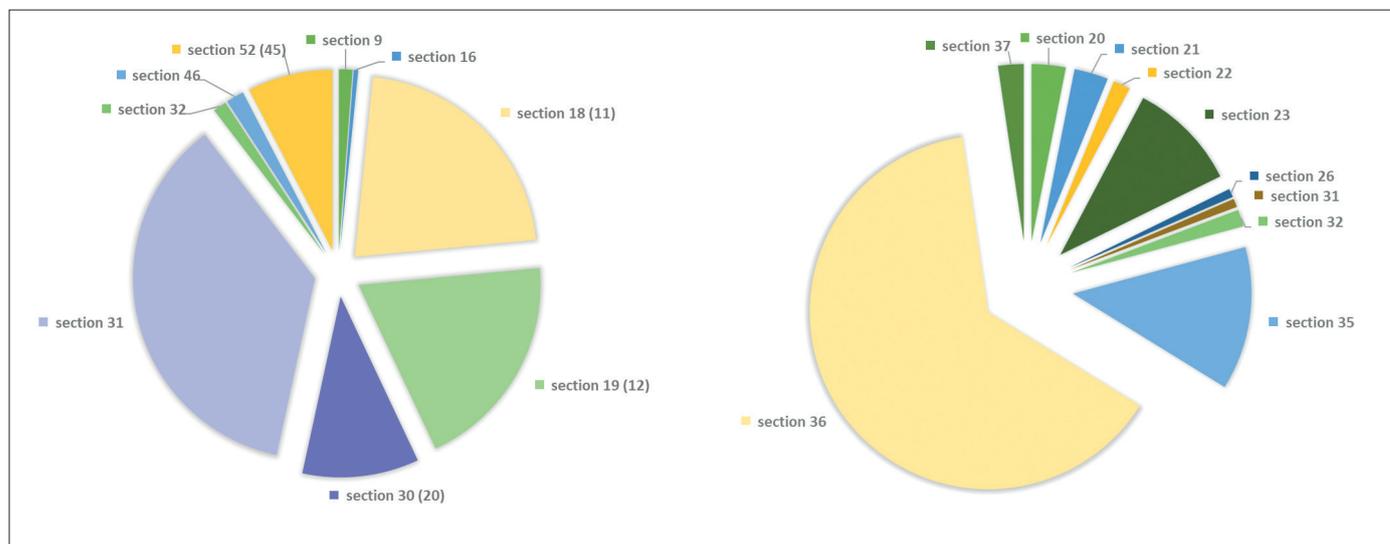


Figure A 1.6 - Effectif total des chercheurs (en activité et après départ) dans les sections et CID du CNRS (à gauche) et dans les sections du CNU (à droite). Les intitulés des sections CNRS concernées sont : 9. Mécanique des solides. Matériaux et structures. Biomécanique. Acoustique, 16. Chimie et vivant, 18. Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles. 19. Système Terre : enveloppes superficielles, 30. Surface continentale et interfaces, 31. Hommes et milieux : évolution, interactions, 32. Mondes anciens et médiévaux, et les commissions interdisciplinaires 46. Environnement continental : logiques et fonctionnements des écosystèmes, 50. Gestion de la recherche, 52. Changements globaux. Les intitulés des sections du CNU sont : 20. Anthropologie biologique, ethnologie, préhistoire, 21. Histoire, civilisation, archéologie et art des mondes anciens et médiévaux, 22. Histoire et civilisations, 23. Géographie physique, humaine, économique et régionale, 26. Mathématiques appliquées et applications des mathématiques, 31. Chimie théorique, physique, analytique, 32. Chimie organique, minérale, industrielle, 35. Structure et évolution de la Terre et des autres planètes, 36. Terre solide : géodynamique des enveloppes supérieures, paléo-biosphère et 37. Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement.

Les sections 31, 18 et 19 sont les principales sections de rattachement des chercheurs, suivies de la CID 52 et de la section 30. En ce qui concerne les universités, l'essentiel des effectifs relève de la section 36 du CNU, suivie des sections 23 et 35 (86 sur 144 collègues pour lesquels nous disposons de l'information ; Figure A 1.6). Cette répartition est cohérente avec les proportions relatives de publications émanant de l'INSU, de l'INEE ou de INSHS (54 %, 40 % et 6 %, respectivement).

Parmi les 819 personnels de recherche identifiés, ceux rattachés à la recherche académique sont distribués dans 86 laboratoires. Parmi ceux-ci 24 laboratoires comptent au

moins dix chercheurs ayant ou ayant eu une activité P&P. Les trois plus gros de ces laboratoires hébergent ~ 30% des chercheurs identifiés. Ce chiffre atteint ~ 50% pour les sept laboratoires principaux (Figure A 1.7)

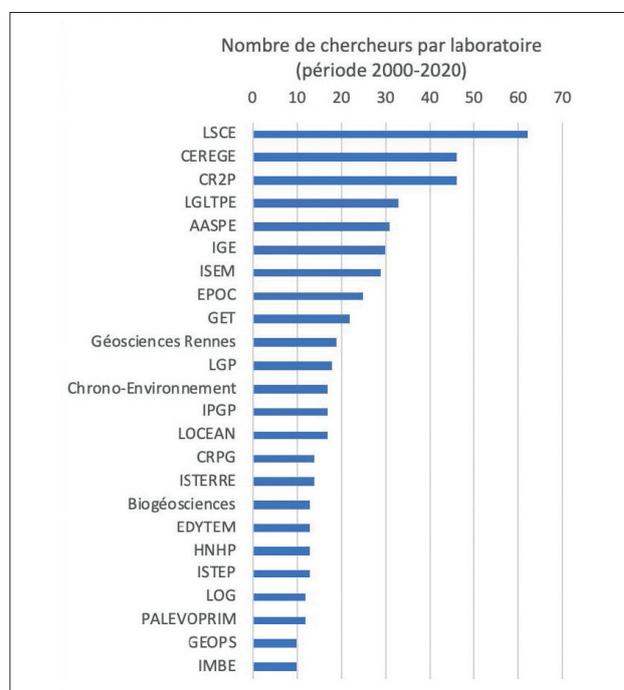


Figure A 1.7 - Effectifs cumulés (en activité et après départ) des chercheurs en P&P par laboratoire. Sont présentés les laboratoires avec un effectif > 10.

A 1.3 GRANDES THÉMATIQUES ABORDÉES

Quatre grandes thématiques scientifiques ont été identifiées à partir de la répartition de la communauté et de l'analyse des différentes prospectives : processus/forçages/rétroaction, impact des processus géologiques, cycles biogéochimiques et l'Homme et son environnement. L'analyse bibliométrique conforte le fait que les recherches associées aux thématiques P&P ont comme premier objectif de renseigner et permettre de comprendre le fonctionnement et les perturbations des enveloppes superficielles du système Terre. Les enregistrements des climats et environnements passés dans les archives océaniques, continentales et glaciaires permettent d'explorer les impacts et les rétroactions de différentes perturbations (forçages) climatiques, biologiques et géodynamiques au cours des temps géologiques (figure A 1.8).

L'analyse bibliométrique donne, de plus, une image de l'évolution relative de ces thématiques. La figure A 1.8 montre que la part relative de ces quatre grandes thématiques n'a cessé de croître dans les publications de la communauté P&P au cours des derniers 20 ans. On note une évolution équivalente du pourcentage de publications pour les grandes thématiques autour des processus/forçages/rétroactions et des cycles biogéochimiques, passant d'environ 10% à environ 18% du total des publications P&P. L'évolution de la fraction des publications dédiées aux processus géologiques montre aussi une augmentation au cours de la période 2000-2020 mais plus modeste (de ~19% à ~23% du total de publications considérées). Les évolutions de ces thématiques est assez conforme à ce qui été annoncé dans les principaux axes de la prospective de Garchy (198). On notera en revanche un très nette progression depuis 2010 des thématiques concernant l'Homme et son environnement. On peut constater que cette augmentation coïncide avec la création de l'INEE en 2009 et aussi avec le renforcement des thématiques « Homme et milieu » dans les appels d'offres de l'ANR, sans qu'il soit possible à partir des éléments disponibles de déterminer lequel de ces deux événements est le plus déterminant dans l'augmentation des publications révélée par l'étude bibliométrique, et dans un contexte où les nouvelles revues en lien avec ces thématiques se multiplient.

Ces tendances indiquent aussi de nettes inflexions par rapport à ce qui était mentionné dans les prospectives de 1998 issues du colloque de Garchy. À cette époque, bien que les questions environnementales soient présentes, les axes de prospective mettaient l'accent sur la variabilité climatique récente, les événements climatiques abrupts, les mécanismes des cycles glaciaires-interglaciaires, le cycle du carbone (océan, biosphère et climat), tectonique, érosion et climat. Les dimensions multidisciplinaires incluant la biologie et l'archéologie étaient moins présentes. Ils ont été pleinement amorcés dans les années 2000 avec le programme multidisciplinaire et inter institut ECLIPSE¹ du CNRS.

1- <http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/03presentation.pdf>

Ces évolutions dans les thématiques, ou la façon d'aborder les questions, par une approche système Terre illustrent que l'un des enjeux actuels est d'apporter de nouveaux éléments de compréhension sur le fonctionnement du système climatique et de ses interactions entre toutes les composantes du système Terre. Les besoins de connaissances approfondies sont multiples et les études P&P abordent de façon de plus en plus pointue les perturbations des grands cycles planétaires, notamment ceux du carbone, de l'eau et des nutriments, ainsi que les changements de la biodiversité, ou encore la dispersion d'éléments, molécules ou isotopes naturels et artificiels issus des activités humaines ou les impactant.

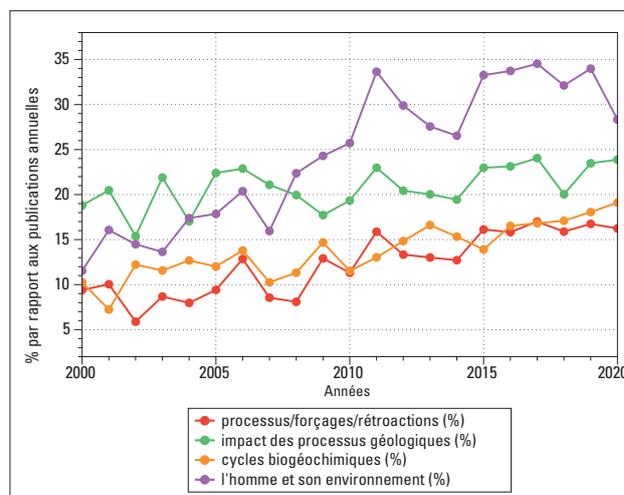


Figure A 1.8 – Évolutions relatives (en % par rapport au nombre de publications annuelles) des publications associées à quatre grandes thématiques identifiées dans les différents documents de prospectives : processus/forçages/rétroaction, impact des processus géologiques, cycles biogéochimiques et l'homme et son environnement.

A 1.4 APPROCHES UTILISÉES

A 1.4.1 Études de terrain

Les champs d'étude P&P s'articulent autour d'objets naturels qu'il faut étudier et/ou échantillonner sur le terrain dans différents milieux (continents, océans et glaces). C'est en particulier le cas pour les objets regroupés sous le terme « archives naturelles » qu'elles soient terrestres (e.g. séries sédimentaires anciennes, lacustres, tourbières, cernes d'arbres, spéléothèmes), océaniques (e.g. coraux, coquilles de bivalves, séries sédimentaires) ou glaciaires (e.g. calottes polaires, glaciers de montagne). La connaissance du terrain, sur les continents ou en mer, est absolument nécessaire en amont des collectes. Elle s'appuie également sur un large éventail d'instruments géophysiques allant du satellite à l'échosondeur et révèle les processus de formation des paysages et de préservation des environnements de dépôt. Elle est souvent à l'origine des premières hypothèses qui orienteront les échantillonnages et les futures campagnes de

forages continentaux, glaciaires ou océaniques (e.g. Flotte océanographique française). Les missions de terrain constituent donc un socle essentiel pour les études P&P. Elles sont plus ou moins complexes à mettre en œuvre et nécessitent pour certaines de lourdes infrastructures nationales et/ou internationales (e.g. stations polaires, cf. section A 2).

L'étude bibliométrique permet d'identifier les sites géographiques les plus étudiés sur les derniers 20 ans par la communauté française et qui conditionnent donc le type de missions de prospection et/ou d'échantillonnage sur le terrain (Fig. A 1.9). Bien que cette information ne puisse être extraite que d'une fraction des publications (de l'ordre de 1/3) elle semble assez représentative de l'activité nationale et de ses principaux centres d'intérêt. En tête de liste pour le nombre de publications se retrouvent la France, l'Europe, l'Afrique et la Méditerranée. Les 30 premiers sites d'étude en nombre de publications montrent une grande diversité avec des activités sur l'ensemble des continents, les pôles et les océans.

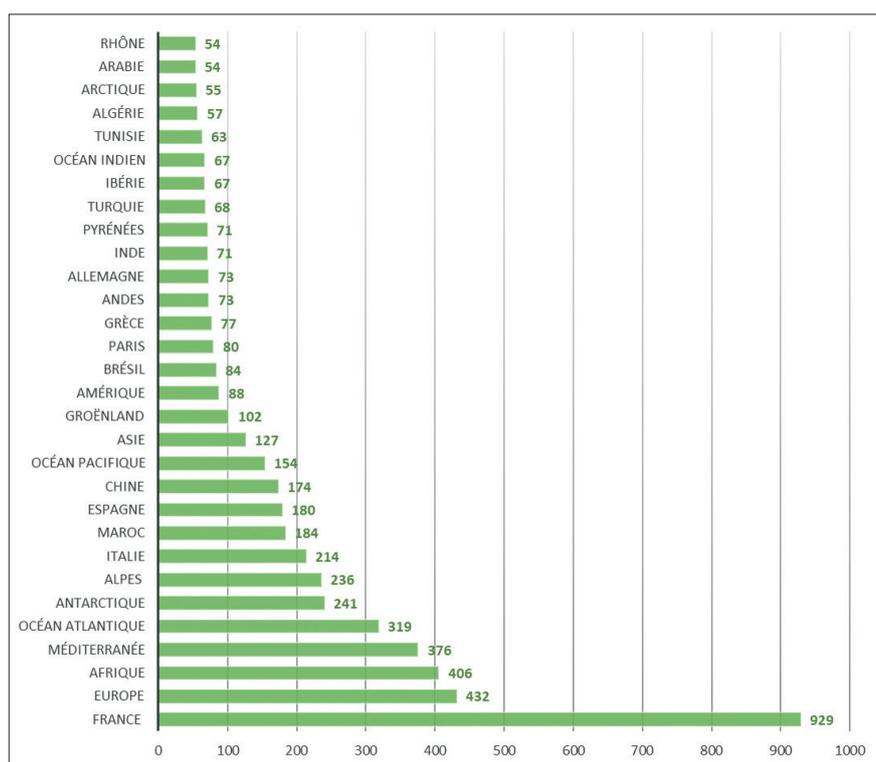


Figure. A 1.9 – principaux terrains d'étude identifiés par le prisme des publications (i.e. mentions de sites géographiques dans les titres et les résumés des articles).

A 1.4.2 Analyses en laboratoire

En fonction des objets échantillonnés et des archives étudiées, différentes approches sont mises en œuvre, depuis les observations naturalistes jusqu'à des études chimiques ou isotopiques nécessitant des technologies de pointe. Pour ces dernières, une première phase de préparation / purification des échantillons est généralement requise faisant intervenir un lourd travail de chimie en amont (e.g. salle blanche, lignes de séparation). Ensuite, les analyses proprement dites font intervenir différents instruments en fonction des éléments recherchés (e.g. composition élémentaire, composition isotopique, comptage d'espèces). Le constant travail de développement au niveau des techniques de préparation et de l'instrumentation permet de mettre en œuvre de nouvelles approches de plus en plus diversifiées (e.g. ADN, mesures de traces, *clumped* isotopes) et place la France dans une position de pointe voire de leader dans certains domaines (e.g. étude isotopique sur les archives glaciaires, gaz rares, radionucléides cosmogéniques, approche CRDS pour les analyses isotopiques de précision, reconnaissance automatique de microfossiles).

A 1.4.3 Instrumentation

Les développements des dernières années ont permis d'augmenter la résolution en travaillant sur de petits échantillons et de façon plus automatisée (e.g. mesures d'aimantation plus rapides, MICADAS pour le 14C). Ces améliorations passent également par l'acquisition de données directes sur le terrain (e.g. mesures *in situ*, analyseur élémentaire et spectromètre laser de terrain). Les nouvelles contraintes sur les approvisionnements en gaz, hélium liquide ou le coût de l'énergie ont aussi entraîné des développements récents de nouveaux instruments plus économes (e.g. têtes cryogéniques pour les magnétomètres).

Les analyseurs élémentaires et les spectromètres laser de terrain ont révolutionné certains pans thématiques en permettant de mettre en œuvre *in situ* des analyses chimiques et isotopiques de haute précision, en particulier issues des stations polaires et des navires. Ces outils utilisés pour une meilleure compréhension de la dynamique des enveloppes fluides permettent, en particulier, le développement et la calibration de proxys utilisés

pour la reconstruction du climat et des environnements du passé.

A 1.4.4 Modélisation

Différents types de modèles sont développés et utilisés pour étudier les processus, l'évolution des caractéristiques environnementales, ainsi que les nombreuses rétroactions intervenant au sein du système Terre. Ils se déclinent sur une gamme comprenant des modélisations conceptuelles, des modèles de complexité intermédiaire et des modèles de circulation générale. La figure A 1.10 présente les échelles spatio-temporelles traitées actuellement par chaque type de modèle. Les dernières années ont vu le développement de modèles de plus en plus complexes permettant de traiter de façon plus approfondie les interactions climat-environnement, ou les interactions entre le climat et l'évolution des calottes de glace ou des continents liés à la tectonique des plaques. De plus, des modèles ont vu le jour pour représenter de manière plus ou moins sophistiquée les fonctionnements des proxies (e.g. coraux, enregistrements sédimentaires, représentation des isotopes de l'eau et du carbone, etc.) qui peuvent ainsi être liés de façon de plus en plus cohérente aux modélisations du climat. Les simulations climatiques se sont étendues à de nombreuses périodes allant des climats du Protérozoïque à la période récente. Des simulations transitoires se sont généralisées pour le dernier millénaire et, plus récemment, l'Holocène et les

cycles glaciaires interglaciaires. Grâce au Paleoclimate Modeling intercomparison Projet (<https://pmip.lsce.ipsl.fr/>), la modélisation des paléoclimats est bien intégrée au niveau international et un sous-ensemble de simulations paléoclimatiques est inclus dans les grands exercices de modélisation de type CMIP et les bases de données internationales associées.

A 1.4.5 Données-modèles

Les comparaisons modèles-données permettent 1) de mettre en cohérence les changements climatiques et environnementaux avec la physique du climat pour en améliorer la compréhension, 2) de tester la crédibilité des résultats des modèles utilisés pour les projections climatiques futures, et 3) de valider l'interprétation des proxies lorsque les résultats analytiques sont retranscrits en grandeurs physiques, biogéochimiques ou environnementales. Les comparaisons utilisent une double approche directe et indirecte. Suivant les cas, les variables climatiques (températures, précipitations, vents...) sont reconstruites à partir des différentes archives climatiques, permettant de tester quantitativement ou qualitativement les variables physiques calculées par les modèles. D'autres approches consistent à modéliser les archives climatiques ou les mesures géochimiques issues de ces archives, comme les isotopes de l'eau ou du carbone, les traceurs géochimiques des circulations océanique et atmosphérique, ou le couvert végétal. Une grande attention

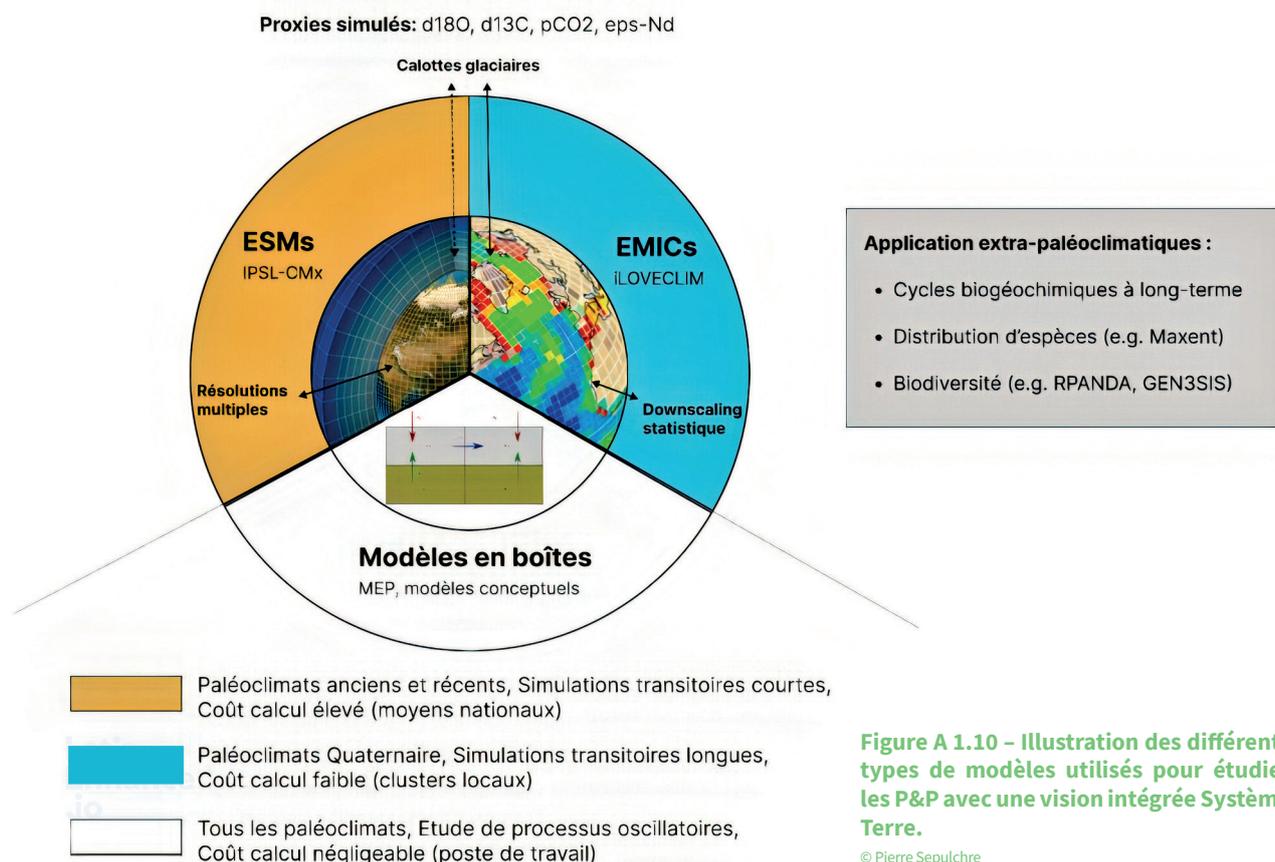


Figure A 1.10 – Illustration des différents types de modèles utilisés pour étudier les P&P avec une vision intégrée Système Terre.

© Pierre Sepulchre

est portée actuellement aux différentes sources d'incertitude et aux développements d'approches quantitatives permettant de déployer des évaluations systématiques. Plus récemment, l'utilisation de méthodes de détection/attribution des changements climatiques ou l'assimilation des données ouvrent aussi de nouvelles voies pour estimer de façon objective l'accord entre les champs simulés et issus de différentes archives environnementales.

A 1.5 COLLABORATIONS NATIONALES VIA LE PRISME DE LA BIBLIOMÉTRIE

L'analyse bibliométrique permet non seulement de regrouper les champs de recherche en domaines cohérents et de matérialiser leurs interconnexions (Fig. A 1.2), mais elle permet également d'identifier les collaborations qui s'établissent entre les laboratoires (Fig. A 1.11).

La taille des bulles (nombre de publications) de la figure A 1.11 est cohérente avec le nombre de personnes rattachées aux différents laboratoires (figure A 1.7), soulignant le niveau de publication général de la communauté. Cette figure montre aussi l'existence de liens étroits entre les communautés impliquées dans l'étude du système climatique et celles étudiant les impacts des changements environnementaux d'origine naturelle ou anthropique sur le vivant. Cet aspect est encore plus flagrant lorsque l'on analyse les connexions entre les laboratoires travaillant sur le climat et ceux travaillant sur l'environnement (Fig. A 1.12). Sans grande surprise, certains laboratoires présentent une spécialisation marquée reflétant les cœurs de métiers et les pratiques des unités, et n'apparaissent donc que dans l'un ou l'autre des graphiques. Les grosses unités diversifiées comme le LSCE ou le CEREGE jouent quant à elles un rôle important dans les échanges inter-thématiques. Dans tous les cas, les échanges et co-publications restent nombreux entre les laboratoires, suggérant une grande complémentarité dans les approches. Ces interactions sont une force de la communauté P&P française qui peut s'appuyer sur la caractérisation des bouleversements anciens de la bio-géosphère afin de comprendre les trajectoires actuelles constatées dans les systèmes climatiques et environnementaux et

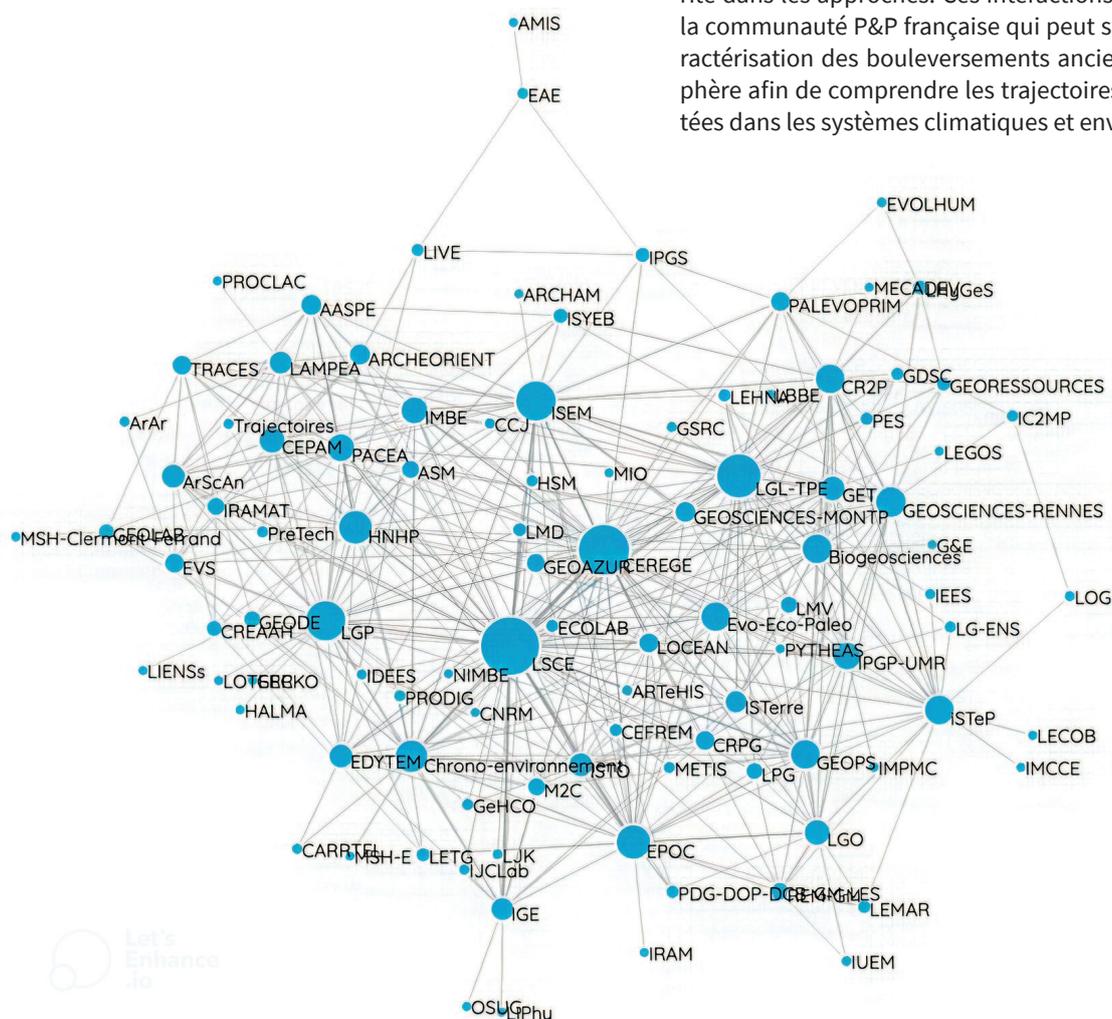
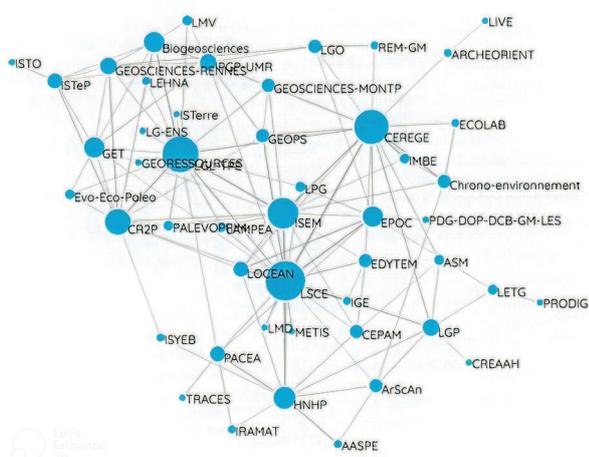


Figure A 1.11 – Collaborations entre les laboratoires P&P vues par le prisme de l'étude bibliométrique. La taille des bulles correspond au nombre cumulé de publications sur la période 2000-2020. Les traits de connexion relient les laboratoires ayant eu plus de 10 publications en commun sur cette période.

les mécanismes impliqués, et apporter ainsi des éclairages sur les grands enjeux actuels liés aux objectifs du développement durable.

Cette cartographie des échanges montre que les approches fortement multidisciplinaires, dont une partie a été initiée par le programme ECLIPSE (2000-2007), sont bien effectives dans les publications. Ces sujets s'inscrivent dans les réflexions inter-instituts et inter-domaines (e.g. LEFE-EC2CO), ou pouvant entrer dans le cadre des appels de la mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) du CNRS.

A) Environnement



B) Climat

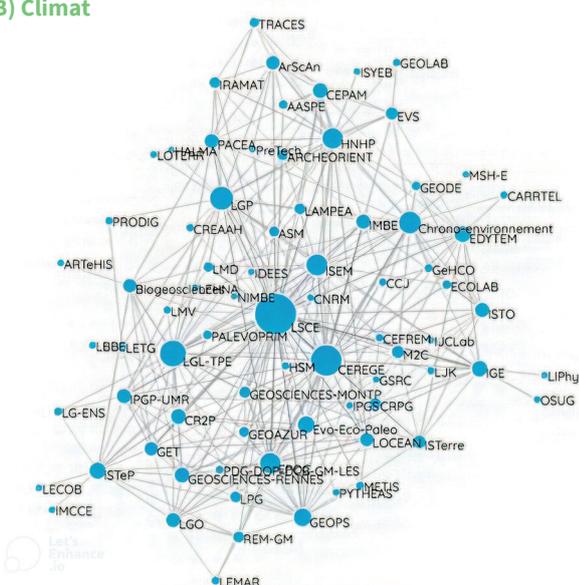


Figure A 1.12 – Comme la figure A 1.11, mais en sélectionnant respectivement les mots a) environnement et b) climat

Néanmoins, les segmentations thématiques qui émergent de la figure A 1.2 et discutées dans la section A 1.1 indiquent que la communauté P&P reste compartimentée par grandes disciplines (océanographie, atmosphère, surfaces continentales) et par périodes de temps (essentiellement pré-quaternaire ou quaternaire). Cette notion de silos et de freins a été relevée dans les différentes consultations. Elle reflète également la structuration des instituts du CNRS, ou des différents organismes de recherche, impliqués sur les thématiques du livre blanc.

On peut aussi noter que les différents documents analysés mettent en évidence un manque d'études intégrées entre les systèmes actuels, récents (Quaternaire) et anciens (pré-Quaternaire) qui permettraient de mieux appréhender les changements futurs. Cela se traduit, par exemple, par la faible représentation des recherches P&P dans le défi 5 de l'INSU (« Modélisation intégrée du système Terre pour l'étude des risques environnementaux »), alors qu'un besoin de « séries longues » issues de « nouveaux marqueurs » a été identifié pour pouvoir appréhender les risques dans leur globalité. Dans d'autres défis de l'INSU, ou documents de prospectives, l'apport spécifique des P&P est peu mentionné, alors qu'il est effectif de longue date.

A 1.6 COLLABORATIONS INTERNATIONALES VIA LE PRISME DE LA BIBLIOMÉTRIE

Les recherches menées en France sont reconnues au-delà des frontières et bénéficient de nombreuses collaborations internationales pour caractériser et mieux comprendre la dynamique des paléoclimats et paléoenvironnements *via* l'acquisition de données (e.g. missions internationales de forages, participation et/ ou gestion de bases de données internationales), la modélisation (e.g. coordination du Paleoclimate Modeling Intercomparison Projet), ou encore la coordination et la participation à des projets de recherche intégrant des partenaires internationaux .

L'analyse bibliométrique donne une mesure de l'ampleur de ces collaborations et des principaux pays concernés, à partir des co-signatures des publications. La figure A 1.13 illustre ainsi la part croissante des publications avec collaborations internationales, dont le nombre annuel passe de ~100 à 500 sur la période 2000-2020. Sur cette même période, le nombre de publications avec collaborations nationales uniquement reste globalement stable, à ~120/an.

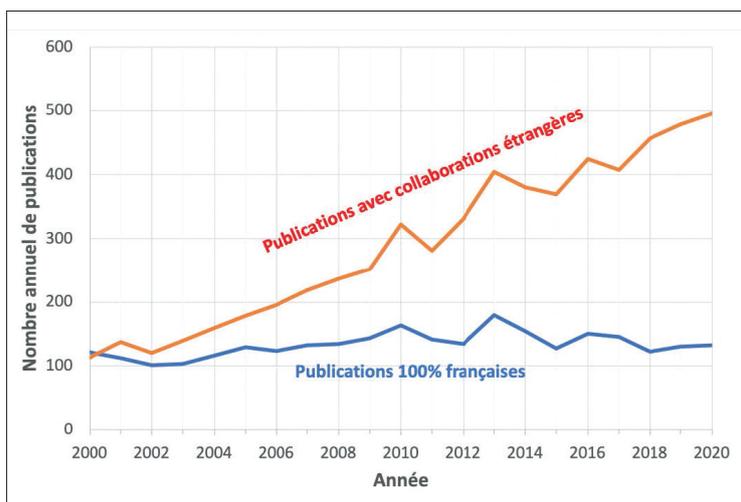


Figure A 1.13 – Évolution du nombre annuel de publications avec collaborations internationales (rouge) et avec collaborations nationales uniquement (bleue)

Les États-Unis et les pays européens, au premier rang desquels on trouve l'Allemagne et le Royaume Uni, constituent les partenaires principaux (Figure A 1.14). Les partenaires suivants, en ordre d'importance décroissante, regroupent l'Italie, l'Espagne, la Suisse, l'Australie, la Chine et le Canada. À plus petite échelle, des collaborations existent avec des pays très divers sur l'ensemble des continents.

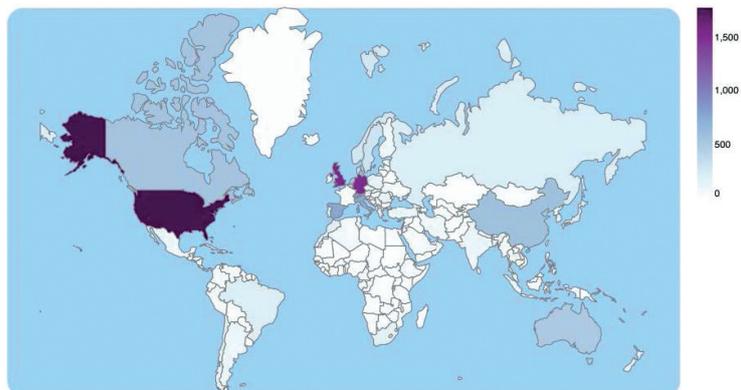


Figure A 1.14 : Collaborations internationales (l'échelle de couleur reflète le nombre de co-publications cumulées sur 20 ans pour chaque pays partenaire).

Le taux d'accroissement sur 20 ans des co-publications avec les 9 premiers pays partenaires (Figure A 1.15) montre que les publications, avec ces pays, ont plus fortement progressé que le taux moyen d'augmentation de l'ensemble des publications recensées (droite pointillée bleue). Alimentée par le développement des financements européens, cette augmentation est particulièrement importante pour le Royaume Uni et l'Allemagne (taux d'accroissement $\sim x 6$) ainsi que l'Italie et l'Espagne. La figure permet également de mettre en évidence le très fort développement des co-publications avec l'Australie ($x 8,2$) mais surtout avec la Chine. Si le nombre de co-publications avec la Chine reste modeste au regard de celui des pays partenaires principaux, la progression sur 20 ans est la plus forte ($x 12,5$).

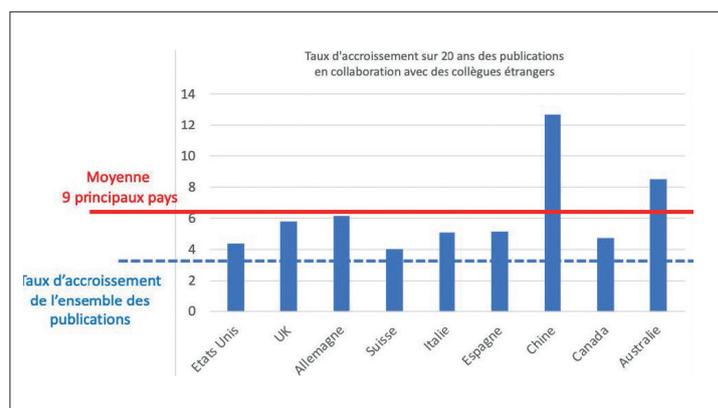


Figure A 1.15 : Taux d'accroissement du nombre de publications annuelles avec des partenaires internationaux. La droite pointillée bleue matérialise la progression du nombre annuel de l'ensemble des publications recensées dans notre base bibliométrique. La droite rouge indique le taux d'accroissement moyen calculé en prenant en compte les seules publications avec les 9 pays partenaires principaux.

A 1.7 IMPLICATION DANS L'ANIMATION DE LA RECHERCHE ET SA GOUVERNANCE AU NIVEAU INTERNATIONAL

La liste des réseaux internationaux de recherche en paléoclimatologie et paléoenvironnement est longue et de nature très variée, qu'il s'agisse d'expertises pour le GIEC, de participations à des comités internationaux relevant de grands programmes internationaux (de l'ICS, de la commission océanographie, de l'UNESCO ou l'UNFCC comme Future Earth, du programme mondial de recherche sur le climat -WCRP, SCOR et des sous-programmes ou groupes de travail qui leur sont liés. Il existe également des groupes *ad hoc* pour les bases de données (Neotoma) ou des réseaux métiers plus spécifiques (e.g. Paleo EaRly Career Seminars; Association for the science of limnology and oceanography; The paleontological society; Society of vertebrate paleontology; The micropalaeontological society; EAG (Goldschmidt), EAOG (IMOG)).

Comme indiqué dans la section 3, une analyse détaillée ne s'intéresse qu'à 3 réseaux représentatifs: l'INQUA (International Union for Quaternary Research)², le projet PAGES (Past Global Changes)³, et le Paleoclimate Modeling Inter-comparison Project⁴ (PMIP).

L'objectif de l'INQUA est de promouvoir une meilleure communication et une collaboration internationale dans les aspects expérimentaux et appliqués de la recherche sur le Quaternaire, afin de contribuer de manière pratique à une évaluation de l'ampleur et des rythmes des changements environnementaux mondiaux au cours du passé géologique

2- INQUA (<https://inqua.org/>)

3- <https://pastglobalchanges.org>

4- <https://pmip.lsce.ipsl.fr/>

5- <https://afeq.hypotheses.org/>

récent. L'INQUA regroupe plusieurs milliers de membres issus d'une cinquantaine de pays. La participation des chercheurs français aux activités structurées et soutenues par l'INQUA a été évaluée par une enquête auprès de la direction de l'INQUA, les participations à des projets financés prévues pour la période 2019-2023 et les contributions au dernier congrès de l'INQUA (2019). Aujourd'hui, environ 1270 scientifiques issus de 86 pays, contribuent à la vitalité de l'INQUA (Figure A 1.16). La représentation française au sein de l'INQUA se fait par le biais de l'Association française pour l'étude du quaternaire (AFEQ), et/ou la participation individuelle de chercheurs au niveau des commissions.

tiel de participation aux réseaux et aux activités financées par l'INQUA. La participation française est davantage due à la motivation des individus qu'à une véritable politique de représentation impulsée par les organismes de recherche français. Malgré cette sous-représentation collective, la France assure actuellement la vice-présidence de l'INQUA et 35 chercheurs siègent dans les commissions de l'INQUA. Sur ces 35 chercheurs, 18 sont activement engagés dans des projets en cours soutenus par l'INQUA. La participation française se répartit de manière relativement équilibrée entre les différentes commissions thématiques : « Coastal & Marine Processes », « Humans & Biosphere », « Palaeocli-

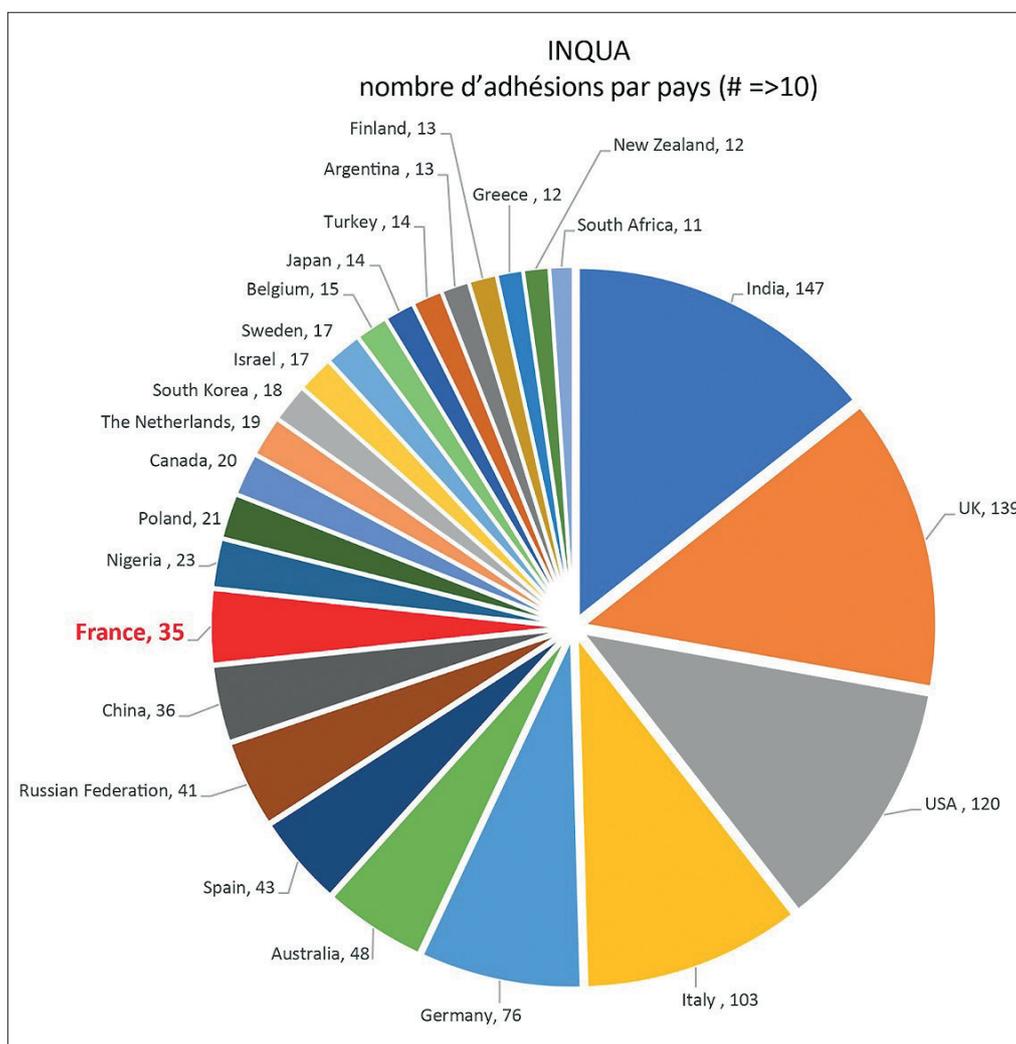


Figure A 1.16 – Répartition des adhésions à l'INQUA par pays

Nous ne disposons pas de tous les chiffres permettant de mener à bien une étude fine de l'implication française dans l'INQUA. Au regard du nombre de chercheurs travaillant sur le Quaternaire en France, elle apparaît cependant sous-représentée (~ 3-5 %) par rapport à d'autres communautés de tailles sensiblement égales, comme le Royaume Uni, l'Allemagne ou l'Italie. En termes d'engagement financier, la France se positionne très en-dessous des pays, en particulier européens, dont le PIB est équivalent. Cela limite le poten-

tiel de participation aux réseaux et aux activités financées par l'INQUA. La participation française est davantage due à la motivation des individus qu'à une véritable politique de représentation impulsée par les organismes de recherche français. Malgré cette sous-représentation collective, la France assure actuellement la vice-présidence de l'INQUA et 35 chercheurs siègent dans les commissions de l'INQUA. Sur ces 35 chercheurs, 18 sont activement engagés dans des projets en cours soutenus par l'INQUA. La participation française se répartit de manière relativement équilibrée entre les différentes commissions thématiques : « Coastal & Marine Processes », « Humans & Biosphere », « Palaeocli-

mates », « Stratigraphy & Chronology » and « Terrestrial Processes, Deposits & History ». Lors du dernier congrès INQUA, tenu en 2019 à Dublin, 6,5% des présentations (n=648) comprenaient des contributions de chercheurs français.

Les objectifs de PAGES sont d'accroître la compréhension des changements globaux passés pour améliorer les projections futures du climat et de l'environnement de façon à informer les stratégies d'adaptation. Pour PAGES, l'évaluation

a porté sur la participation de la communauté française aux comités de pilotage, aux groupes de travail thématiques et aux conférences. Il y a actuellement 201 scientifiques français membres de PAGES pour ~ 5000 scientifiques de 125 pays (4%). Les thématiques où les français sont les plus présents sont les suivantes: paléoclimat, paléofeux, paléohydrologie, interglaciaire, océan, mousson, isotopes, activité volcanique, dynamique de glace, Pliocène, poussières, transfert de sols et sédiments, dynamique forestière, couverture du sol. Les chercheurs français ont été impliqués dans 12 des 32 groupes de travail financés par PAGES sur les 20 dernières années. Actuellement, un chercheur et une chercheuse CNRS sont membres du comité de pilotage scientifique (dont l'un aussi du comité exécutif). Cinq autres chercheurs français ont été membres du comité de pilotage de PAGES depuis 2000. La France est bien représentée aux congrès PAGES (5ème pays en nombre de participants aux deux derniers congrès, 2017 et 2013), avec entre 5 et 10% d'animateurs de session. Les participations sont en général un peu plus faibles que celles d'autres pays européens comme l'Allemagne. Les contributions par des auteurs français ou la coédition de numéros du magazine PAGES peuvent être soulignées, avec 9 numéros de PAGES magazine sur 73 co-édités. On peut également noter le fort investissement d'éditeurs et dans la nouvelle revue Horizon de PAGES qui vise un public jeune et diversifié.

Le dernier exemple analysé, PMIP, corrobore les conclusions sur le décalage entre le potentiel de la communauté française à prendre des responsabilités internationales et l'engagement plus large de la communauté concernée. PMIP compte environ 660 inscrits sur sa liste de diffusion. La France ne se trouve qu'en 3ème position dans le nombre de participants à ce projet dans un peloton regroupant le Royaume uni et l'Allemagne (figure A 1.17). Le plus grand nombre de participants provient des États Unis mais reste largement en deçà des participants européens en cumulé, reflétant aussi la taille et la vitalité de la communauté de modélisation des paléoclimats dans les différents pays européens en général, et en France en particulier.

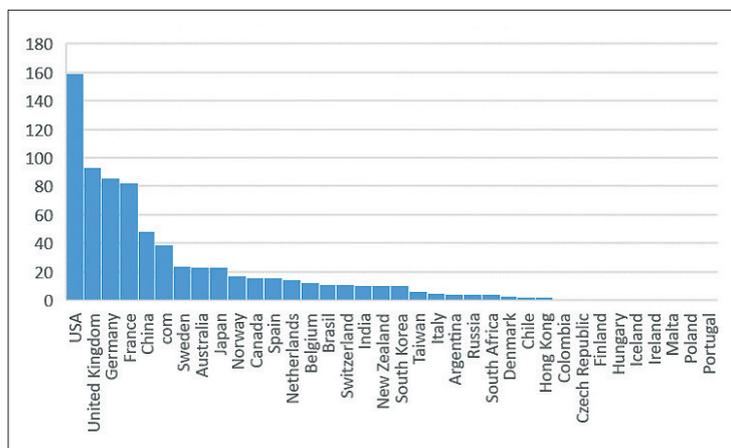


Figure A 1.17 – Répartition des participants à PMIP en fonction des pays, estimé à partir de la liste de diffusion du projet.

Les exemples ci-dessus confirment une participation active de la communauté française à la coordination de l'activité internationale, mais soulignent que cette participation est un peu frileuse au regard d'autres pays européens. Un meilleur lien entre l'international et la mise en place d'un suivi et d'encouragement à la participation à ces comités et groupes de travail internationaux seraient nécessaires pour mieux asseoir les leaderships de la communauté française. Deux éléments ont été suggérés dans les différentes consultations, et concernent l'accompagnement financier et une meilleure reconnaissance de ce type d'activité, qui ne soit pas que d'ordre individuelle. Un manque de coordination et de visibilité des engagements et des échanges au niveau national sur l'activité internationale est aussi relevé comme une source de confusion et de mécompréhension du paysage et des enjeux.

A 1.8 ANIMATION ET RÉSEAUX NATIONAUX STRUCTURANTS

La communauté P&P est majoritairement structurée par les domaines de l'INSU : domaine OA (Océan Atmosphère), Surfaces Continentales (SIC), Terre Solide (TS), ainsi que par ceux de l'INEE et, en plus faible proportion, de l'INSHS qui organisent régulièrement des prospectives scientifiques couvrant leurs périmètres thématiques. L'analyse bibliométrique confirme cette organisation tout en soulignant les nombreuses interactions et collaborations entre les laboratoires, qui transcendent souvent ces découpages programmatiques et administratifs

L'organisation de colloques, journées thématiques, conférences (qui a son pendant à l'international) se retrouve également au travers des réseaux nationaux structurés par les sociétés savantes. Certains de ces groupes constituent un miroir des sociétés savantes internationales et/ou ont de fortes interactions internationales *via* l'organisation de conférences ou réunions de travail. Sans viser l'exhaustivité, on peut citer à titre d'exemple :

- AFEQ-CNF INQUA (Q), qui est le pendant national de l'INQUA⁶;
- SGF (Société Géologique de France, qui organise la RST tous les 4 ans)⁷;
- ASF (Association des Sédimentologues Français)⁸;
- SFIS (Société Française des Isotopes Stables)⁹;
- FROGs (association des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique)¹⁰;
- GMPCA (Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie)¹¹;
- SAP (Société d'Anthropologie de Paris)¹²;
- Groupe français des argiles ;

6- <https://afeq.hypotheses.org/>

7- <https://www.geosoc.fr/>

8- <https://www.sedimentologie.fr/>

9- <https://sfis.eu/>

10- <http://geochimie.fr/>

11- <https://gmPCA.fr/>

12- <https://www.sapweb.fr>

- Groupe français du Crétacé;
- Association des palynologues de langue française;
- Association française de limnologie;
- Association des Géologues du Permien et du Trias;
- Association Paléontologique Française.

La structuration se fait également au travers de réseaux métiers comme :

- Carotteurs Continental Français (CCF);
- Milieux Souterrains et Karst (MSK).

La taille de la communauté justifie ces regroupements de spécialistes. Néanmoins, l'analyse du comité et les consultations suggèrent que les questions scientifiques communes nécessitent d'avoir des lieux d'échanges et points de rencontres multidisciplinaires. Plusieurs initiatives sont plébiscitées et peuvent servir de base de réflexion. C'est le cas par exemple du rôle des GDRs Rift et Bioarcheodat qui regroupent des sous-ensembles de la communauté autour d'objets multidisciplinaires permettant des approches systémiques. Ces GDR ne peuvent cependant pas représenter l'ensemble des activités P&P, au risque de diluer leurs objectifs. D'autres structurations se développent à l'échelle des OSUs ou des fédérations, comme le groupe paléo de l'IPSL qui permet de rassembler les efforts des laboratoires sur quelques sujets et d'offrir des moyens communs sur des aspects à renforcer, sur des sujets à fort potentiel, mais souvent critiques en termes d'accompagnement technique et humain (bases de données, comparaisons modèles données, traceurs et isotopes). Un autre point de rencontre national recevant un intérêt croissant sont les « journées Climat et Impacts ».

La lettre Paléo, coordonnée par Guillaume Paris est également très appréciée. Une telle initiative dépend du bon vouloir des personnes impliquées et n'a pas de garantie de pérennisation. Une réflexion doit être engagée pour permettre la diffusion de l'information au sein de la communauté et renforcer les échanges sur l'actualité scientifique.

La communauté nationale s'est aussi organisée pour réfléchir à l'empreinte carbone de ses activités. Une partie des laboratoires hébergeant la communauté ont eu un rôle pionnier dans les démarches d'évaluation et réduction du bilan carbone de leurs activités, et sont partie prenante du collectif labos 1.5 (on peut citer notamment l'initiative « Ma Terre en 180 minutes » portée par l'IRD, <https://materre.osug.fr/>).

Les conclusions du livre blanc rejoignent les conclusions des défis INSU 3 & 4 (« Enregistrement géologique des crises environnementales » et « Interactions entre crises environnementales et écosystèmes »). La communauté P&P française ressent un besoin de coordination à l'échelle nationale. Il existe actuellement un fort sentiment de cloisonnement qui reflète les disciplines, la structuration de la recherche par rapport aux thématiques et aux sections du CNRS, aux milieux étudiés, aux périodes de temps, aux échelles spatiales

privilegiées ou aux approches (terrain, analytique, modélisation) employés. Il y a de fait un risque d'éparpillement au sein de nombreuses structures pouvant être préjudiciable à l'élaboration d'une feuille de route nationale permettant de relever les défis scientifiques multidisciplinaires identifiés. De nombreuses questions sont soulevées sur la façon de consolider les interactions et favoriser les confrontations entre les différents points de vue sur le climat, l'environnement, la biodiversité et les sociétés.



A2. Infrastructures nationales et internationales mobilisées

Les axes de recherche permettant de répondre aux questions scientifiques identifiées mobilisent de nombreux moyens pour les campagnes de prélèvement, les mesures, les synthèses de données, les simulations ou les comparaisons modèles-données. Les sections ci-dessous rassemblent les principaux moyens nationaux et internationaux dans lesquels les équipes sont fortement impliquées ou dont elles sont fortement dépendantes

A 2.1 LES FORAGES ET CAROTTAGES DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX

De nombreuses missions de terrain ont recours aux moyens de forages et carottages. Les moyens déployés et infrastructures de références dépendent du milieu considéré (Fig. A 2.1).

A 2.1.1 Moyens nationaux de carottages/forages continentaux

La France dispose d'un parc d'instruments et d'une expertise rare à l'échelle mondiale dans le domaine du carottage en domaine continental, en particulier sur les lacs. Ces moyens sont actuellement répartis à l'échelle du territoire. Les réflexions des dernières années ont abouti en 2022 à la labellisation d'un parc national d'instruments, appelé « carottage continental France » (CCF). Cette infrastructure hybride conjugue un service national dédié, avec son matériel, ses moyens et ses personnels affectés directement par les instituts du CNRS (INSU et INEE à l'heure actuelle) et un réseau d'unités de recherche qui mettent en commun leurs ressources matérielles et humaines. Le CCF met l'accent sur la formation et la sécurité des personnels, *via* un réseau métier dédié. Ses orientations technologiques sont décidées dans un comité, regroupant les unités fournissant des ressources et un conseil scientifique. Une assemblée des utilisateurs décide des orientations scientifiques.

Sur les 5 dernières années d'exercice (hors COVID), le C2FN, précurseur de CCF, a mené en moyenne 2 missions de carottage lacustre et 2 missions de carottage à pied sec par an (Figure A 2.2). De leur côté, les unités mènent en moyenne jusqu'à deux grosses missions chaque année. L'objectif de CCF, *via* la mise en commun de l'ensemble des ressources disponibles et l'élaboration d'une programmation concertée, est de doubler ce résultat. Il faut ajouter à ce constat le fait que la très grande majorité des équipes se contente de matériels très légers pour carotter en milieu continental. On est typiquement dans une logique de « longue traîne des données » qui rend extrêmement difficile la quantification de l'activité. À titre d'indice, les seules données entrées dans la cyber-carothèque nous indiquent que 123 missions ont été réalisées depuis 2018, la plupart en domaine conti-

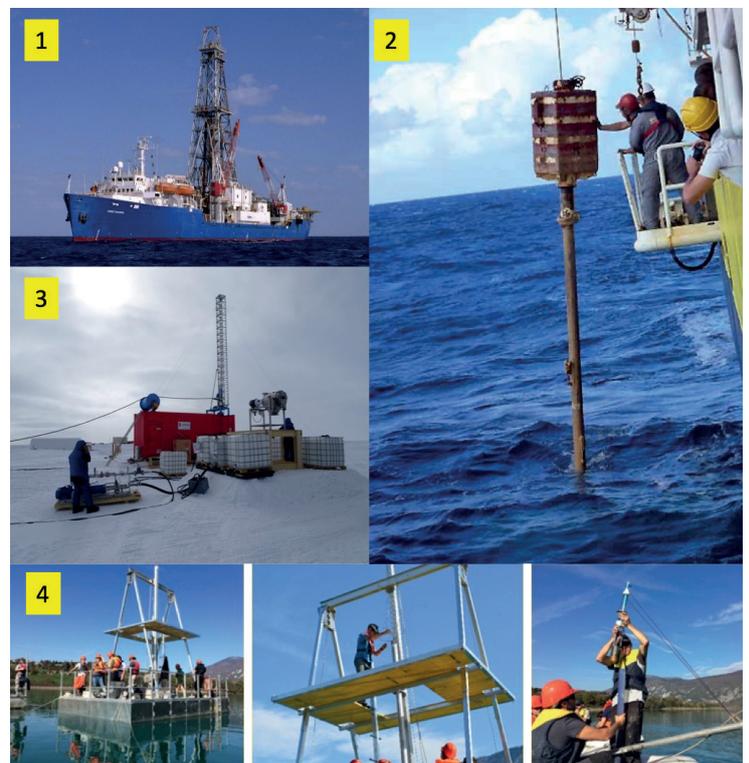


Figure A 2.1 – Quelques exemples de plateformes de forage ou de carottage. (1) Navire de forage du programme international IODP; (2) déploiement du carottier géant CALYPSO sur le N/O Marion Dufresne; (3) forage en Antarctique pour les tests de la sonde SUBGLACIOR; (4) mise en œuvre de la barge de forage lacustre « Double A » développée dans le cadre de l'Equipex Climcor par l'équipe du C2FN.

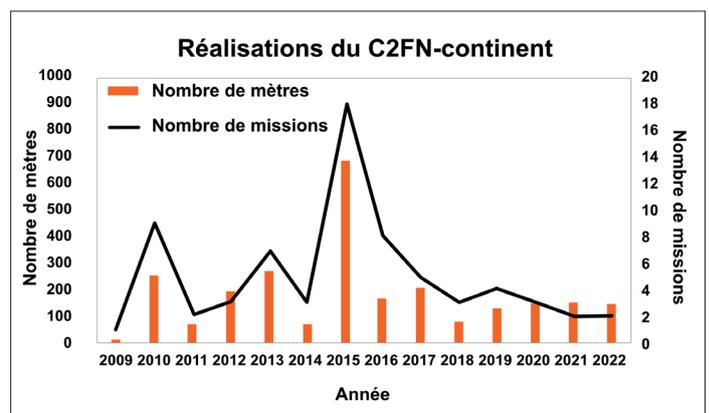


Figure A 2.2. Évolution des nombres de mètres de carottes et de missions réalisées par l'atelier de forage de la DT-INSU depuis la création du C2FN en 2009. Cette structure est devenue le cœur de l'instrument national CCF en 2022. Ces missions représentent une fraction infime de l'activité de carottage en domaine continental, mais ce sont les missions les plus ambitieuses, utilisant les matériels les plus lourds opérés par une équipe technique dédiée.

mental, pour un total de plus de 1000 prélèvements.

En favorisant les liens entre des équipes qui auraient pu évoluer de manière autonome, CCF *via* son réseau de métiers et son conseil scientifique, joue un rôle de structuration des activités de recherche qui dépasse la seule fourniture de matériel d'étude. Grâce à ce parc instrumental des carottes de 50 m maximum - et au-delà lorsque des conditions optimales le permettent - peuvent être réalisées en domaine terrestre (sondeuse thermique) et de 30 m en domaine lacustre.

A 2.1.2 Accès aux moyens de forages continentaux internationaux ICDP

En complément du CCF, l'accès aux programmes de forages ICDP¹² offre une opportunité de forages en domaine continental et la possibilité de collaborations internationales sur la thématique P&P. Le modèle ICDP nécessite un cofinancement. ICDP couvre les frais du workshop de préparation de la proposition de forage et, une fois le projet accepté, environ 20% du coût des forages (avec un plafond à environ 2 M€). Il ne fournit aucun budget à la recherche post-forage. Les budgets doivent être consolidés dans les 2 ans après acceptation pour réaliser le forage. Il est regrettable que la participation française reste modeste par rapport à d'autres nations. En effet, de 1996 à 2018, 80 workshops ont été financés et 55 projets de forages ont été retenus au niveau mondial. Sur toutes les propositions, les scientifiques français ont déposé 38 projets en tant que 1^{er} à 3^e place, la France n'est ainsi que le 5^e pays après les USA (315), l'Allemagne (139), le Japon (54), et le Royaume Uni (51). Entre

2016 et 2021, en ce qui concerne la communauté française cinq forages ont été acceptés, deux sur les thématiques P&P. Sur ces deux forages, un n'a pas abouti pour des raisons géopolitiques (PI français) et le second a été réalisé sans cofinancement français. Un projet de forage profond sur la thématique P&P a été retenu en 2022 avec un PI français. Il est à noter qu'un certain nombre de projets acceptés par ICDP ne verront jamais le jour faute de cofinancement.

A 2.1.3 Carottages glaciaires

La communauté est bien structurée autour du F2G (Plateforme française de forage glaciaire, <https://forage-glaciaire.osug.fr/>) labellisé instrument national communautaire INSU et du groupe Carottes de glace France (choix de priorités de forages, animation scientifique, groupe auto-organisé et auto-financé). La figure A 2.3 montre l'évolution du nombre de mètres forés par an *via* la plateforme F2G. Les forages polaires sont réalisés en forte coordination avec l'IPEV, qui est partie prenante des grands projets, et dont l'activité est dépendante des moyens logistiques disponibles (station Concordia, moyens de transport...). Le groupe de forage français est essentiel pour les forages glaciaires, actuels et à venir, dans le paysage européen. Il permet à la communauté de mener des projets de recherche, avec acquisition de carottes de glace uniques, et de jouer un rôle clef dans les projets européens et internationaux (comme Beyond EPICA en Antarctique). Le groupe carottes de glace France a été leader dans les dernières années de programmes de forages courts en Antarctique (ASUMA en 2016-2017, EAIIST en 2019-2020, ICORDA-KATABATIC en 2022-2023) malgré un contexte financier très contraint pour la logistique liée

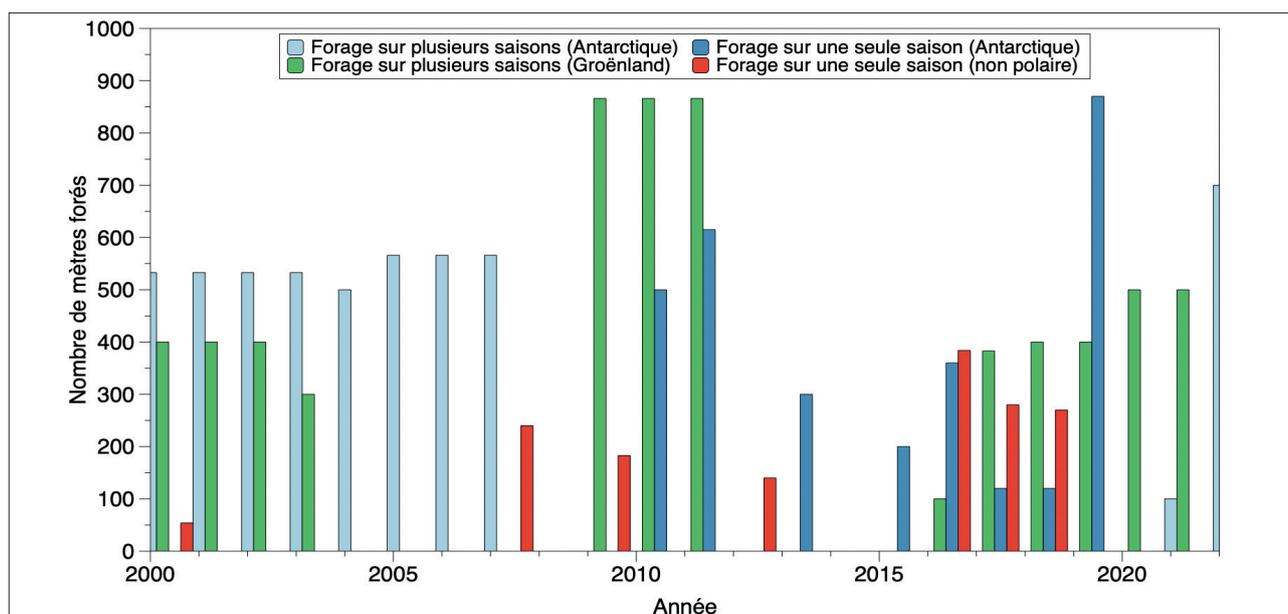
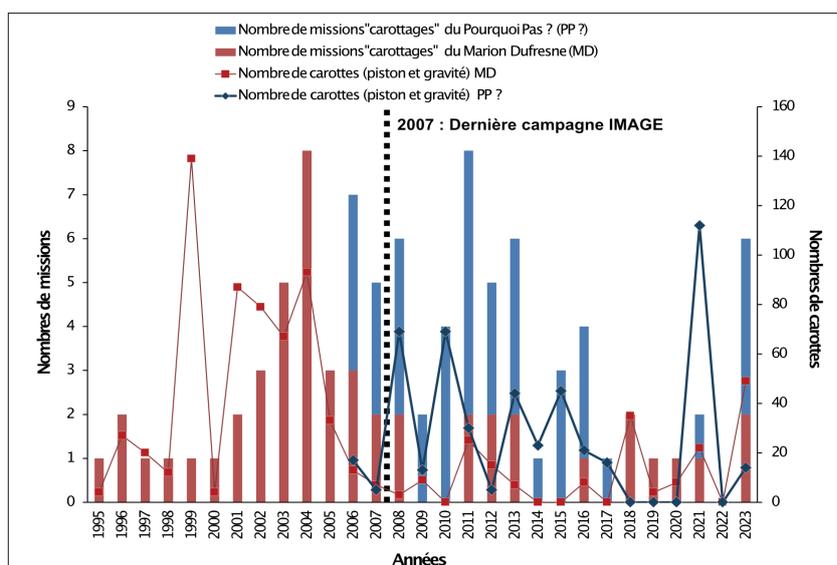


Figure A 2.3 – Évolution du nombre de mètres forés par an par l'équipe française de forage (plateforme F2G). Certains forages courts (< 300 m) sur des programmes de surface se font sur une seule saison (en violet pour l'Antarctique et en marron pour le non-polaire). Les forages plus profonds (2 – 3 km) se font sur plusieurs saisons d'été consécutives (rouge et rose pour l'Antarctique et vert pour le Groenland).

12-<https://www.icdp.net/>

Figure A.2.4 – Évolution depuis 1995 des nombres de campagnes de carottage réalisées et de carottes prélevées, par le Marion-Dufresne (MD) et le Pourquoi Pas? (PP).



à l'IPEV. L'augmentation des coûts du fret et du carburant menace fortement le bon déroulement des campagnes à venir. La participation des équipes françaises aux carottages du Groenland (NEEM, GRIP, NGRIP, EGRIP) s'est inscrite dans le cadre de coopérations internationales, sous le leadership logistique des Danois. Les équipes scientifiques françaises sont très impliquées dans le pilotage des nouveaux projets sur la glace profonde et basale du Groenland (ERC Green2Ice, NSF) et de l'Antarctique (BEYOND EPICA, ANR ToBe).

A.2.1.4 Moyens nationaux de carottages marins

Le parc de carottiers et le savoir-faire français sont uniques au monde comme l'illustre, par exemple, le record du monde de longueur de carottage (plus de 80 m) obtenu sur le navire océanographique Marion-Dufresne à l'aide du carottier CALYPSO. L'expertise, initiée par l'IPEV, s'est diversifiée depuis les années 2000 avec le développement du carottage CASQ et l'implémentation du carottage long sur les navires de l'Ifremer (~ 35 m pour le Pourquoi Pas ? et ~ 15 m

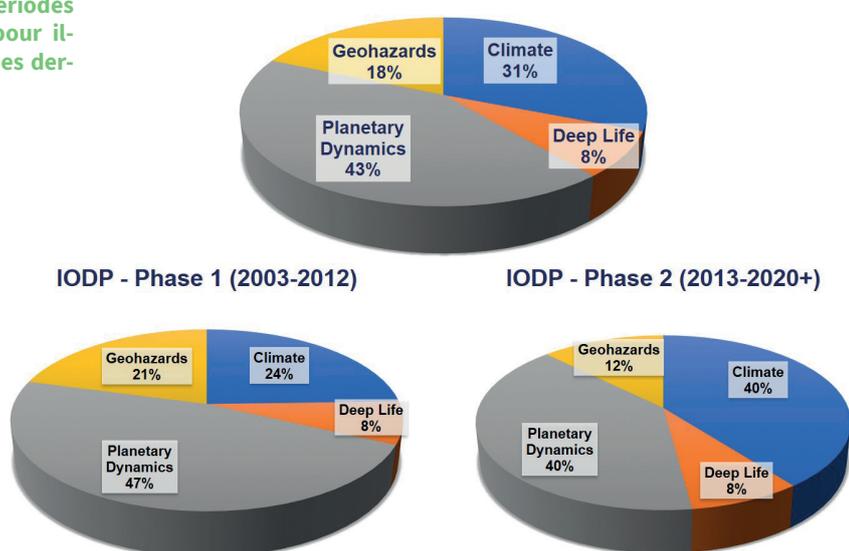
pour l'Atalante). Depuis 2018, les moyens de carottage, spécifiques à chaque navire, sont hébergés au sein de la TGIR Flotte océanique française (FOF). La communauté française paléo-océanographique a été fortement structurée et active à la fin des années 1990 autour du programme IMAGES dont elle a été un acteur principal pour son initiation, sa mise en œuvre et l'exploitation des carottages effectués. Elle fait face depuis quelques années à des difficultés croissantes liées à l'évolution des moyens de carottage, de l'accès aux navires et aux financements de l'exploitation du matériel recueilli. Le nombre de campagnes hauturières incluant du carottage est en déclin (Figure A.2.4).

A.2.1.5 Accès aux moyens de forage marins internationaux IODP et ECORD :

Les demandes de campagnes P&P à l'échelle internationale émergent également au programme international de forage IODP, auquel participe la France via l'IR* ECORD/IODP. Ce programme était décliné en 4 axes : *Climate*, *Deep*

Figure A.2.5 – Illustration des thématiques couvertes par les expéditions IODP pour l'ensemble de la période 2003-2020 (haut) et les sous-périodes 2003-2012 et 2013-2020 (bas) pour illustrer l'évolution thématique des dernières années.

Thématiques - Expéditions IODP (2003-2020+)



Life, Earth Dynamics et *Geohazard*. Pour les derniers 20 ans, les demandes reliées à l'axe « climat », principal volet de la communauté P&P, constituaient 31% des campagnes en moyenne (figure A 2.5), avec une nette augmentation depuis 2013 (de 24 à 40%). La participation de chercheurs français aux expéditions IODP offre l'opportunité unique de développer des collaborations internationales. Le soutien budgétaire de l'IR* ECORD/IODP permet, outre le soutien aux expéditions, de financer des analyses et, depuis 2015, des post-doctorants.

La diminution du soutien financier de la NSF pose la question du financement d'IODP à moyen et long termes (i.e. nécessité de trouver des financements complémentaires).

Les moyens de carottage en milieu côtier sont par contre plus limités, à l'interface entre moyens de carottage continentaux et hauturiers.

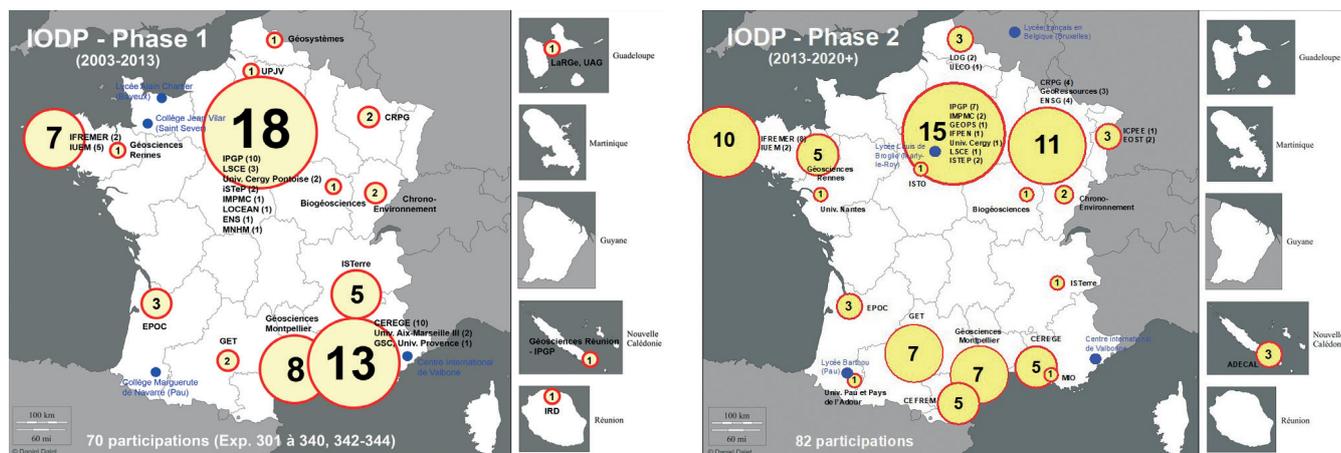
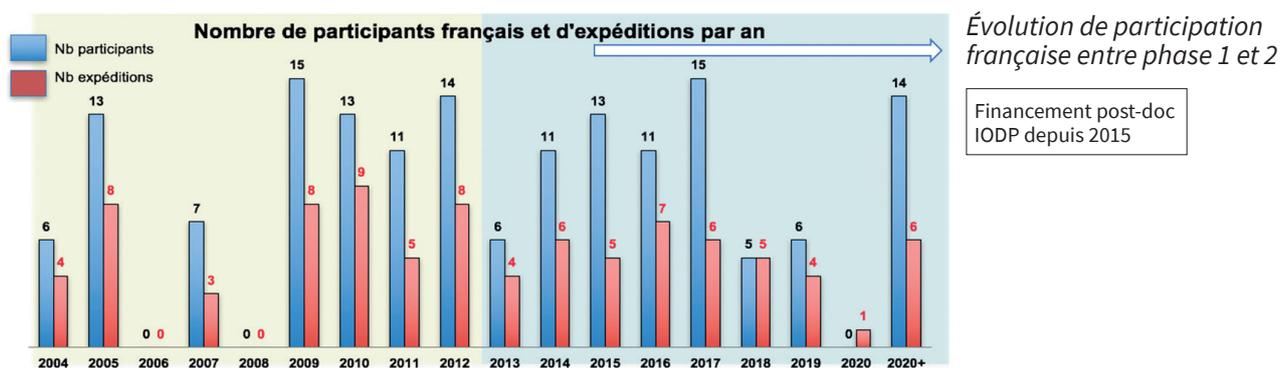


Figure A 2.6 – bilan des projets IODP

La figure A 2.6 montre aussi une continuité de la présence française depuis 2004 atteignant jusqu'à 15 scientifiques embarquant certaines années. Néanmoins, le recensement des campagnes d'envergure avec co-porteur français montre la faible implication des membres des laboratoires français en tant que chefs de mission. Certains verrous intrinsèques au fonctionnement de ce programme ont été évoqués dans les consultations pour ce livre blanc: investissement de longue haleine dans le montage des propositions de forages avant leur programmation - i.e. 5 ans minimum; co-portage des missions avec un des états leader; longue durée des missions en mer bloquante pour les EC; programmations de campagnes calquées sur la position géographique des navires. Un meilleur accompagnement des équipes est nécessaire.

A 2.2 CAROTHÈQUES, LITHOTHÈQUES ET COLLECTIONS DE RÉFÉRENCE

On distingue trois grands types de collections associées aux P&P: les carothèques, les lithothèques et les collections paléontologiques et archéologiques de référence. À ces trois catégories correspondent des besoins spécifiques, notamment en termes de conditions de conservation et de volume de stockage.

A 2.2.1 Sédiments

Les nombreux entrepôts dédiés aux carottes de sédiment en France sont pour la plupart gérés par des unités de recherche sur leurs ressources propres. La carothèque gérée

par Ifremer à Brest constitue une exception puisqu'elle bénéficie de personnel dédié et sa capacité de stockage a été récemment augmentée par l'adjonction d'un bâtiment de 900 m². Cette carothèque accueille exclusivement des carottes marines. Une autre exception est la carothèque du Muséum national d'histoire naturelle de Paris (MNHN) qui bénéficie de crédits pour la maintenance des collections et d'une enseignante-chercheuse en charge de sa gestion. Au niveau des unités, les principales carothèques sont gérées par EPOC, le LSCE, le CEREGE, EDYTEM et Chrono-environnement. Le LGP héberge quant à lui une « loessothèque » unique regroupant plusieurs milliers d'échantillons prélevés sous formes de séries continues. Les capacités de stockage des carottes sédimentaires arrivent à saturation dans la plupart de ces unités, qui réclament un plus grand soutien de la part de leurs organismes de tutelle et une politique coordonnée au niveau national pour sauvegarder des archives patrimoniales uniques et permettre d'accueillir les nouveaux prélèvements sédimentaires. Le BRGM possède une carothèque importante, dont l'essentiel des carottes est localisé à Orléans. Il faut noter également les carothèques gérées par des musées régionaux. Il existe enfin des carothèques qui archivent des échantillons issus de forages profonds industriels. C'est le cas, par exemple, de la carothèque STC à Boussens (700 000 échantillons géologiques issus de 124 pays) qui est accessible à la communauté scientifique mais *via* un coût non négligeable.

A 2.2.2 Glace

La carothèque glaciaire est essentiellement localisée à Grenoble et sur la station antarctique de Concordia. Le stockage Antarctique permet une meilleure préservation des échantillons (-50°C) mais complexifie les campagnes de découpe. Les coûts de fonctionnement de ces stockages froids à Grenoble sont importants et essentiellement financés sur budget IGE. Les inventaires sont partagés au sein du groupe Carottes de glace France afin de favoriser l'accès de la communauté aux échantillons et sont organisés en 3 types : « carottes projet » issues de forages récents et temporairement réservées à un projet (après 2 ans, une participation aux frais de stockage est demandée), « patrimoine national » constitué de carottes partagées au sein du groupe CGF, et « patrimoine international » dont l'accès est soumis à autorisation d'un Steering Committee international. Les carottiers profonds sont partagés à l'international dans le cadre de grands projets communs (Europe : EPICA, Beyond EPICA, etc.) à la fois très collaboratifs et très compétitifs en interne. Le financement est difficile pour la jouvence de grosses infrastructures et de gros équipements (chambres froides pour stockage et préparation des échantillons, chambres sans poussière, instruments « traditionnels » mais indispensables pour les mesures de base sur les carottes de glace).

A 2.2.3 Roches

Les lithothèques (collections de roches ou de lames minces), moins exigeantes en termes de conditions de conservation et de volume de stockage, sont dispersées dans les unités. Le besoin d'une gestion conservatoire des échantillons se fait plus pressant que ce soit pour les collections de référence ou les échantillons provenant de régions au contexte géopolitique tendu. L'INSU a mandaté Etienne Ruellan pour établir un rapport sur les collections géologiques, leur gestion et les conditions de conservation. Ce rapport a été finalisé à l'été 2022¹³.

A 2.2.4 Autres archives

Pour les archives plus spécifiques (e.g. coraux, coquilles, spéléothèmes, échantillons d'arbre, fossiles), à l'instar des roches, les collections sont hébergées dans les laboratoires des chercheurs concernés, avec cependant quelques initiatives individuelles. Certains laboratoires hébergent des collections de référence paléontologiques (e.g. la base de données pollinique européenne est hébergée à l'IMBE, la base de données pollinique africaine est hébergée à l'IPSL, etc.) et archéologiques (disséminées dans de nombreux laboratoires, dont le PACEA).

Les chercheurs se sentent assez démunis devant l'ampleur du travail pour classer ces collections et sont très conscients de la nécessité de les rendre accessibles à la communauté. Rationaliser les approches au niveau national en s'appuyant sur les expertises des laboratoires requiert une coordination pour assurer la pérennisation des efforts. Les stratégies développées dans certains laboratoires du MNHM ou étrangers peuvent servir de modèle. Un accompagnement humain est indispensable pour initier un tel chantier au niveau national. Un parallèle avec la cybercarothèque nationale peut servir d'exemple, d'autant plus qu'un exercice est en cours pour y ajouter les spéléothèmes.

A 2.3 PARC ANALYTIQUE FRANÇAIS ET RÉSEAU RÉGEF

RÉGEF¹⁴ (Réseau géochimique et expérimental français) est une Infrastructure de recherche transverse, qui regroupe les moyens analytiques des laboratoires pour fournir des mesures aux programmes de recherche, aux Services nationaux d'observation (SNO), et à d'autres infrastructures de recherche. Le réseau regroupe des instruments de mesure, d'imagerie et d'expérimentation au sein de 135 plateformes regroupées dans 12 sous-réseaux analytiques thématiques dont 11 concernent potentiellement la communauté P&P (Figure A 2.7). Chaque sous-réseau de RÉGEF alimente des réflexions sur l'optimisation des analyses, l'organisation

13- <https://www.calameo.com/books/006460587e3e64bf8b283>

14- <https://www.regef.fr/>

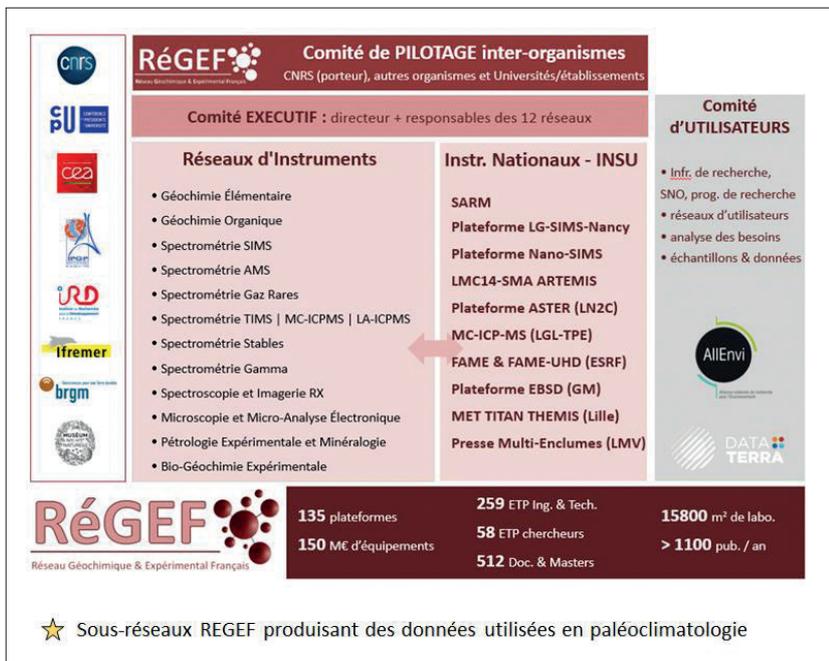


Figure A 2.7 – Caractéristiques du parc instrumental RéGEF

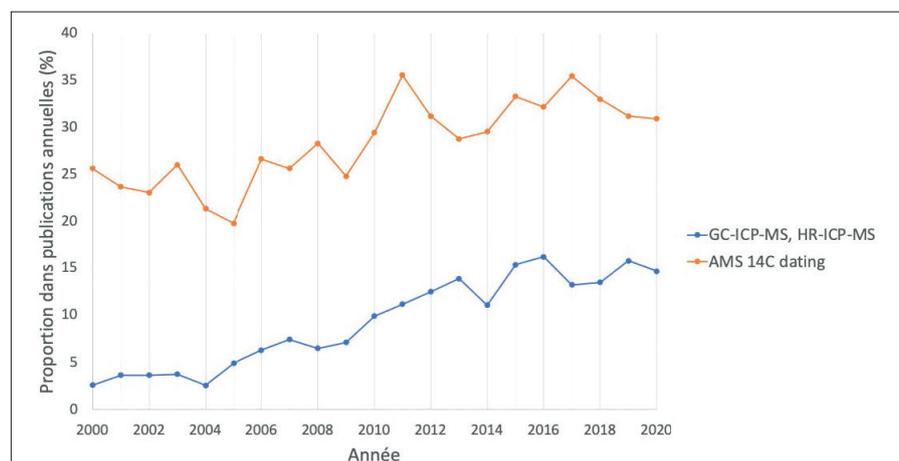
des moyens humains et techniques, et l'uniformisation des meilleures pratiques. Enfin, RéGEF met en commun des savoir-faire, une gestion des données (stockage, uniformisation, distribution), et la prise en compte de l'adéquation instruments/personnels permanents.

Deux grands types de données issues des infrastructures de RéGEF nourrissent les reconstructions P&P: 1) la reconstruction des conditions paléoenvironnementales par les traceurs géochimiques (les « proxies »), qu'il s'agisse d'indicateurs paléoclimatiques (températures, précipitations, biologie), de paléocirculations océaniques et atmosphériques (traceurs radiogéniques, poussières) ou de la composition des paléo-atmosphères (gaz, aérosols), 2) la datation des archives climatiques, qu'il s'agisse de roches, des glaces, de matière organique ou de biominéralisations. Certains instruments nationaux, comme les spectromètres de masse par accélérateur ARTEMIS (LMC14) et ASTER (LN2C) bénéficient ainsi d'un fonctionnement ouvert en réseau, au service de la communauté. Certaines techniques de datations comme la luminescence (OSL, IRSL) ont cependant accumulé du retard par rapport à d'autres pays.

La figure A.2.8 donne deux exemples d'évolution de l'utilisation de techniques analytiques lourdes par la communauté P&P, qu'il s'agisse de plateformes intégrées dans le réseau RéGEF (mesures des éléments traces et de leurs isotopes par GC-ICP-MS et HR-ICP-MS) ou de l'outil national ARTEMIS (datation carbone-14 par AMS). Cette figure souligne l'explosion de l'analyse des éléments traces, avec une multiplication par 7 sur 20 ans du pourcentage de publications. Les datations ¹⁴C par AMS progressent plus modestement (de ~ 25 à 32%) mais le fait qu'elles soient citées dans 1/3 des résumés des publications 2000-2020 montre combien cette approche a été, et reste, un outil essentiel pour les communautés travaillant sur le quaternaire supérieur et les périodes récentes.

D'autres aspects analytiques, non géochimiques (ex : paléomagnétisme), sont également mis en œuvre dans quelques laboratoires français, avec une gestion totalement indépendante de RéGEF. Le stockage en archive ouverte de ce type de données géophysiques est en cours de construction, à l'instar des données géochimiques, et doit s'inscrire dans une réflexion d'interopérabilité des bases de données, pour permettre, par exemple, la construction automatisée de modèles d'âges (carottes sédimentaires, glaciaires).

Figure A 2.8 – Évolution sur 20 ans de la proportion des publications annuelles faisant appel à la datation ¹⁴C par AMS et l'analyse isotopique par GC-ICP-MS ou HR-ICP-MS.



A 2.4 CALCUL ET DONNÉES POUR LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

A 2.4.1 Moyens de calcul

La modélisation des paléoclimats fait appel à une hiérarchie de modèles, incluant des modèles de complexités intermédiaires et les modèles de circulation générale. Selon le type de modèles et de simulations, les simulations sont réalisées sur des stations de travail individuelles, les clusters de calcul des laboratoires, des méso-centres (ex ESPRI à l'IPSL), les calculateurs nationaux (GENCI) ou Européen (PRACE). Les ressources informatiques des laboratoires ou méso-centres sont fournies par les laboratoires ou les projets individuels. L'accès aux ressources de calcul nationales se fait *via* des demandes annuelles en réponse aux appels d'offres de GENCI¹⁵. Le nombre d'heures attribuées depuis 2010 par GENCI (comité CT1) suit une loi de Moore avec un doublement tous les 17,1 mois. De 2015 à 2021, la part de la P&P est passée de 1,4% à 3,9%, soit d'un coût d'environ 99 k€ à 1150 k€ par an. Cette forte augmentation correspond à une montée en puissance de la modélisation des climats anciens et des simulations transitoires longues. Seulement 2 projets P&P ont bénéficié jusqu'à présent des ressources européennes PRACE. Ils ont permis de lancer les simulations transitoires de l'Holocène et l'assimilation des données paléo pour le dernier millénaire.

A 2.4.2 Infrastructure CLIMERI-France

Les simulations s'appuyant sur le modèle de l'IPSL bénéficient des outils de simulation, monitoring, analyses, bases de données développées et mises en place à l'IPSL, et de la coordination nationale offerte par l'Infrastructure de recherche CLIMERI-France¹⁶. Au-delà des simulations et de leur diffusion, cette infrastructure participe à la définition des grandes orientations nationales vis-à-vis du calcul scientifique, du développement des modèles de climat (ou modèle système Terre) des chaînes de calcul et l'analyse des résultats (partage méthodologique ou logiciels).

A 2.5 ARCHIVAGE ET ACCESSIBILITÉ DES DONNÉES

La place des données est critique, non seulement au niveau de leur acquisition, mais aussi au niveau de leur stockage et de leur accessibilité à différents types d'utilisateurs. Ces aspects sont chronophages et coûteux. Ils demandent une expertise pointue pour décrire les données et associer des métadonnées permettant d'en vérifier la qualité et la signification.

Pour les thématiques « Paléoclimats & Paléoenvironnements », les deux principales bases utilisées par les chercheurs sont le World Data Center for Paleoclimatology (NOAA) et PANGAEA. Il s'agit d'entrepôts généralistes qui accueillent des données déjà publiées. Neotoma est un autre

système, particulièrement prisé des paléocéologues (paléobiodiversité, notamment taxonomiques). Des bases thématiques, telles la European Pollen Database ou la Global Paleofire Database, hébergées en France, ou ICE-D, base co-gérée par Berkeley et des laboratoires français, favorisent la réutilisation des données. De nombreuses données ne franchissent encore pas le seuil des laboratoires. Ces initiatives internationales permettent de valoriser et de rendre accessibles les données publiées. Cependant, l'identification des échantillons et les moyens mis en œuvre pour les collecter sont référencés de façon trop succincte dans ces bases et les métadonnées obligatoires ne sont pas homogènes.

On peut noter l'implication des équipes dans différentes réflexions au niveau national et international. Les démarches s'inscrivent dans la volonté de s'approprier des standards pour mieux échanger les données et répondre aux exigences de la science ouverte sur leur traçabilité.

À l'échelle internationale, un standard est en cours de construction pour les bases de données issues des différentes archives climatiques et environnementales: LiPD (Linked Paleo Data¹⁷). Ce standard favorise l'interopérabilité des données et leur réutilisation. Néanmoins la reconnaissance de ce standard au niveau national n'est pas encore acquise et risque de freiner son déploiement, ce qui représente une source d'inquiétude pour l'avenir des bases de données ainsi assemblées. Dans le cadre du thème paléo soutenu par l'IPSL et *via* le financement du projet ACCEDE du Forum Belmont (PI: Nick McKay, USA), la base de données de pollens africains a été entièrement revue et remise en ligne (<https://africanpollendatabase.ipsl.fr/#/home>). Une base de données paléo multi archives (e.g. glace, sédiments marins et lacustres, coraux, arbres) et multi-traceurs (e.g. comptages, isotopiques, élémentaires, magnétiques) est également en cours de développement.

En plus de l'aspect interopérable de ces bases de données, y compris avec les bases de données de simulations, l'objectif est de fournir des outils simples de recherche et de visualisation. Les efforts contribuent aussi à convaincre les chercheurs d'accepter de rendre accessible leurs données *via* d'autres bases de données et, plus généralement, de mettre à disposition des jeux de données qui ne sont pas encore disponibles en ligne (« dark » data). Un atout majeur, permis par LiPD par rapport aux bases de données classiques, est le renseignement et la structuration obligatoire des données chronologiques. Ces bases de données ne sont pas de simples librairies de données brutes mesurées, mais hébergeront des données interprétées (avec leurs données brutes d'origine).

En ce qui concerne la modélisation, la généralisation du format netcdf et la standardisation des métadonnées en faci-

15- <https://www.genci.fr/fr>

16- <https://climeri-france.fr/>

17- <https://lipd.net/> et <https://lipdverse.org/>

litent la diffusion. Les simulations de référence bénéficient de la base de données distribuées ESGF (Earth System Grid Federation). Il reste néanmoins de nombreuses hétérogénéités et l'attribution de DOI permettant la traçabilité n'est pas encore généralisée à tout type de simulations. Il n'est pas non plus certain qu'il faille que ce soit le cas, toutes les simulations n'ayant pas vocation à être pérennes.

Au niveau national, d'autres évolutions sont à signaler. Le CNRS s'engage à fournir des identifiants pérennes uniques, au standard IGSN. Pour tout type d'échantillon stratigraphique « carotte » et bientôt pour les spéléothèmes, la « Cyber-carothèque nationale », issue du projet equipex CLIMCOR, permet de passer le relais du terrain à l'unité de stockage, puis au laboratoire analytique, sans perte d'information. De même, depuis 2021, un groupe de travail adossé à RÉGEF s'occupe du dossier relatif au stockage des données de manière « ouverte » et pérenne, selon les principes FAIR (poste d'IR ouvert au concours par le CNRS en 2022). L'unification des méthodes permettant la mise en œuvre de labels garantissant de manière automatique la qualité des données, en incluant notamment la description des métadonnées (nature des échantillons, standards, bruit de fond analytique) est en cours.

On peut aussi noter que la gestion conservatoire des données intermédiaires ayant conduit (ou non) à un résultat scientifique est aussi l'objet d'interrogations. Ce type de gestion est assuré par DataTerra et ses déclinaisons qui reprennent peu ou prou les contours des domaines de l'INSU. Cependant, la nature extrêmement variée des données P&P et le fait qu'elles ont la particularité de relier espace et temps au travers de modèles d'âges les rendent difficiles à intégrer dans les silos existants.

A 2.6 CES MOYENS SONT-ILS SUFFISAMMENT CONNUS ET UTILISÉS DE FAÇON OPTIMALE ?

Les réponses au questionnaire et les différentes consultations font état de visions « mitigées » sur la façon dont les différentes infrastructures ou les données sont utilisées, évoluent et répondent au besoin.

Les camemberts de la figure A 2.9 révèlent ainsi que 70% des sondés estiment que les ressources offertes par les infrastructures ne sont pas utilisées de façon optimale, particulièrement en raison d'une méconnaissance d'un paysage qui est complexe. Il ressort un souhait de favoriser l'accès aux collections patrimoniales/de référence en les rendant plus visibles sans alourdir leur accessibilité. Les réponses ~50-50 à la question concernant l'adéquation entre besoins ou attentes vis-à-vis de ces infrastructures reflètent aussi un souhait de mieux structurer sans alourdir. Néanmoins 70% expriment des inquiétudes sur l'avenir des infrastructures. Ces réponses sont motivées par le manque de moyens humains et financiers pérennes, la complexité des finance-

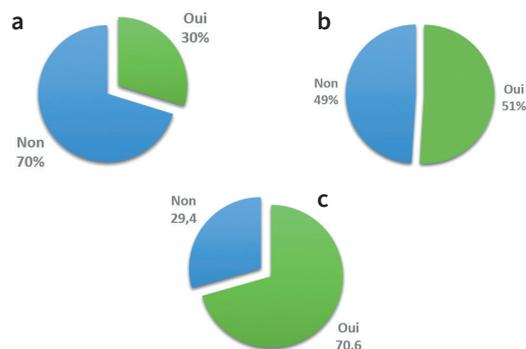


Figure A 2.9 – Réponse au questionnaire sur les infrastructures d'utilisation des données

a : utilise-t-on de façon optimale les ressources offertes par les infrastructures ?

b : les infrastructures répondent-elles bien à vos besoins et à vos attentes ?

c : avez-vous des inquiétudes pour l'avenir de ces infrastructures ?

ments mi-lourds ou lourds qui nécessitent une multiplicité de guichets pour obtenir les financements nécessaires, et par le manque d'adaptation à la paléo des plateformes et des bases de données centralisées.

Une partie des réponses provient de la diversité des approches nécessaires pour aborder les questions scientifiques P&P. Les réponses et commentaires révèlent également une difficulté des petites équipes à accéder aux collections des autres structures. Au-delà des fonctionnements et moyens, il ne faut pas sous-estimer les pratiques scientifiques, le manque de confiance quant à l'utilisation des données et le besoin de valorisation des travaux d'acquisition de données.

Ces avis mettent en évidence également des points bloquants concernant les comparaisons modèles-données. Parmi les nombreux facteurs recensés, on notera en particulier la disponibilité de synthèses de données, les nombreuses sources d'incertitudes, les différences entre échelles d'âges, l'adéquation entre le contenu des modèles et les questions posées, ainsi que l'accès aux données et aux simulations.

Un élément de structuration nationale découlera du besoin des sciences P&P de prolonger les séries temporelles de données actuelles sur des durées permettant de mieux appréhender les dynamiques du climat et de l'environnement à plus long terme pour restituer la variabilité et l'état de base pré-anthropique (un ou plusieurs siècles, mais également à l'échelle du millier et du million d'années). Mieux associer les données actuelles et les données paléo est nécessaire et peut être abordé, par exemple, en lien avec certains services d'observation ou dans le cadre de chantiers territoriaux à l'appui de choix d'adaptation.

A3. Principales évolutions thématiques des dernières années et opportunités

A 3.1 GRANDES ORIENTATIONS ACTUELLES

L'analyse de l'évolution des thématiques (section A 1) et les réponses au questionnaire confortent le fait que les grandes thématiques scientifiques regroupées dans la figure A 3.1 forment le socle sur lequel se sont construites de nombreuses collaborations inter laboratoires. Elles constituent aussi les grandes lignes qui sous-tendent les activités scientifiques dans les prochaines années.

Les réponses au questionnaire permettent aussi de mieux cerner les forces en présence et les points de vigilance pour les prochaines années. Leur analyse révèle que l'étude des réponses aux différentes perturbations (forçage) du climat et de l'environnement reste une force de la communauté (30% de réponse en 1^{er} choix). Comme indiqué dans la section A 1, une nette inflexion s'est opérée et les interactions Homme-environnement reçoivent une attention équivalente, voire légèrement supérieure (35% en 1^{er} choix), à celles des forçages et

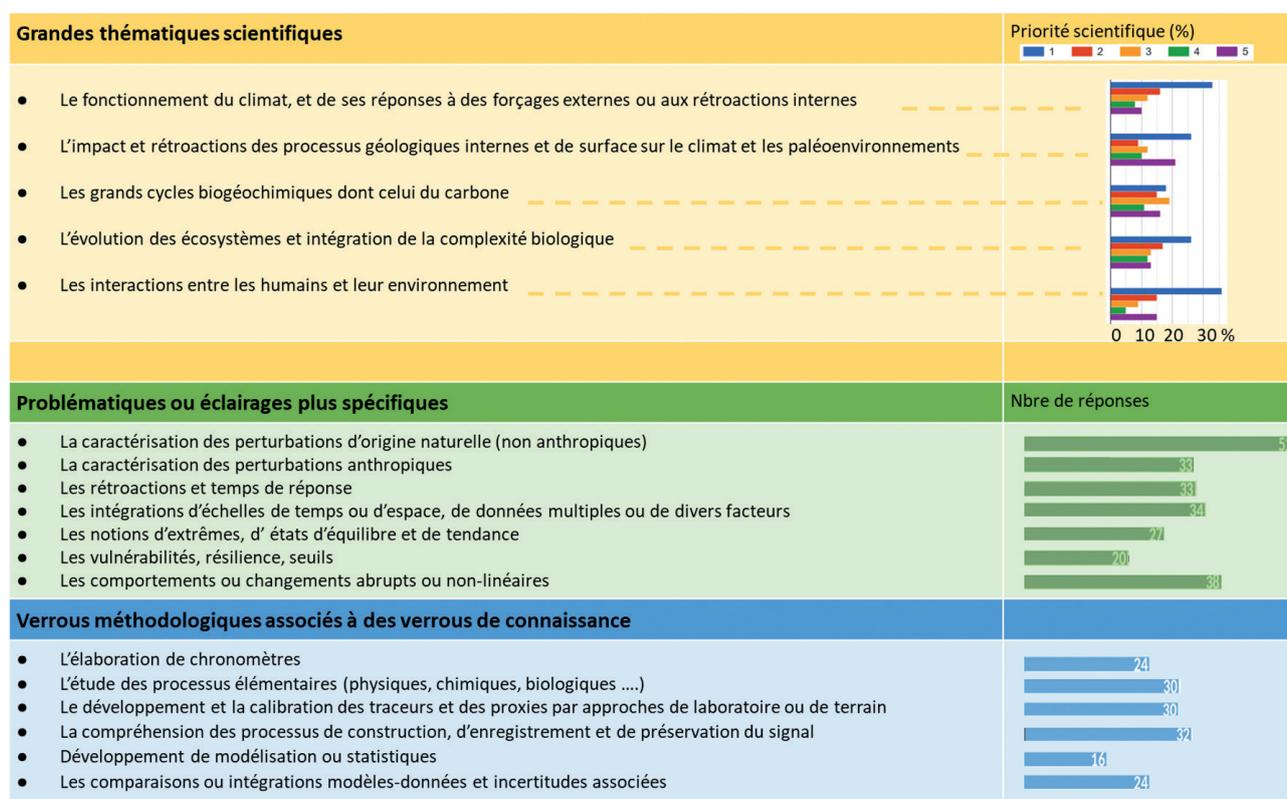


Figure A 3.1 – Principales thématiques et approches caractérisant le cœur des activités de la communauté P&P en France et servant de références pour l'élaboration des prospectives. Les grandes thématiques (jaune) sont présentées en donnant pour chacune d'elle le niveau de priorité scientifique issu des réponses au questionnaire. Ces niveaux sont répertoriés de 1 à 5, 1 étant une priorité majeure et 5 un sujet non abordé. Les éclairages thématiques plus spécifiques (vert) ou les verrous méthodologiques (bleu) apportent des précisions sur la façon dont les thématiques sont traitées. Les barres horizontales correspondent au nombre de personnes travaillant ou voulant travailler sur ces axes plus spécifiques. Ces nombres sont indicatifs et issus des réponses au questionnaire et permettent de donner une image des forces en présence sur les différents aspects.

rétroactions. Le fort intérêt en choix 1 et 2 des thématiques liées à l'évolution des écosystèmes et l'intégration de la complexité biologique vont dans le même sens.

L'intérêt reste marqué pour les impacts des processus géologiques interne et de surface (25% de réponse en 1^{er} choix), mais le fait que 20% des réponses ne mettent pas ce choix en priorité (choix 5) alerte sur les cloisonnements au sein de la communauté. En effet, ces réponses font écho aux cloisonnements (thématiques et organisationnels) mentionnés dans la section A 1 entre les périodes pré-quaternaire et quaternaire, ou entre les longues (> 1000 ans) et plus courtes (< 1000 ans) échelles de temps. Un rapprochement entre les différentes échelles de temps *via* des réflexions scientifiques conjointes permettrait certainement d'amplifier les interactions.

De même, l'intérêt est marqué pour les études des grands cycles biogéochimiques, avec des proportions équivalentes sur les choix 1 à 3. La plus faible proportion de choix en première priorité interpelle sur les forces en présence. Ces résultats suggèrent que peu de spécialistes abordent le fonctionnement des cycles biogéochimiques à l'échelle globale ou que l'étude des cycles biogéochimiques se fait au travers d'autres aspects environnementaux recevant une attention plus grande en premier choix. Ils suggèrent aussi qu'il y a encore des efforts d'intégration à faire pour mener de front des études à l'échelle globale traitant de façon intégrée les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone (et autres cycles biogéochimiques) et les questions plus régionales pour lesquelles l'étude de ces cycles va de pair avec l'étude du fonctionnement des écosystèmes. Notons aussi que l'échelle locale est une échelle privilégiée pour les études archéologiques.

A 3.2 OPPORTUNITÉS LIÉES AUX CAPACITÉS ANALYTIQUES ET DE MODÉLISATION

Les thématiques répertoriées dans la figure A 3.1 vont se développer en France au travers d'éclairages plus spécifiques et de verrous méthodologiques ou de connaissances. Les inflexions dans les questionnements ont été relevées dans plusieurs documents. Les exemples les plus fréquents concernent :

- les notions d'état d'équilibre des systèmes naturels et de leurs temps de réponse à des perturbations environnementales, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique ;
- l'étude des processus élémentaires physiques, géochimiques ou biologiques à de fines échelles de temps et d'espace et l'établissement des règles d'intégration à plus grandes échelles ;
- la caractérisation des vitesses et des temporalités/fréquences des rétroactions et des changements associés, à toutes échelles de temps et d'espace ;
- la définition de différents types d'extrêmes, de leur amplitude, de leur récurrence et des périodes de transition hors équilibre entre ces extrêmes ;
- l'évaluation et l'analyse de la résilience des écosystèmes (de l'échelle locale à l'échelle globale), de leur vulnérabilité et d'éventuels phénomènes de seuil et d'irréversibilité.

Ces exemples traduisent la grande diversité et la multiplicité des problématiques ou des éclairages spécifiques auxquelles la communauté répond (Figure A 3.1), en s'appuyant sur les progrès ayant permis d'augmenter toujours plus la résolution temporelle et spatiale des reconstitutions, de diminuer les incertitudes des calages chronologiques, de croiser les signaux obtenus à travers des approches multiproxies, et de réaliser des intégrations plus systémiques entre climat et environnement.

Les réponses au questionnaire confirment que des changements de paradigmes, de concepts ou de nouvelles

possibilités ont orienté (63 %) les sujets de recherche dans les dernières années. Ces inflexions sont liées à l'étude de nouveaux objets, l'analyse des rétroactions, les intégrations d'échelles et une focalisation sur des événements clefs. De même, les pratiques de travail ont évolué grâce aux développements de nouvelles méthodes, à l'arrivée de nouveaux outils, ainsi qu'à un renforcement des approches multidisciplinaires. Les éclairages et verrous recensés dans les prospectives sont conformes aux orientations principales de la communauté française. Les réponses au questionnaire permettent aussi d'y apporter des compléments concernant les chronologies sociétales à haute résolution, les possibilités de définir des indicateurs de vulnérabilité des écosystèmes, une plus grande prise en compte des dynamiques d'érosion des sols, prenant en compte le transfert et la transformation des éléments dans les milieux.

Les documents et réponses au questionnaire (86,7 %) s'accordent et font aussi apparaître un fort intérêt pour les questions de saisonnalité, de variabilité interannuelle, séculaire et millénaire quelle que soit la période considérée. L'étude de la variabilité ou d'événements extrêmes est rendue possible, y compris dans les périodes pré-quatennaires, par le développement de méthodologies permettant de mieux isoler les effets de la saisonnalité et d'analyser des événements particuliers ou des enregistrements (e.g. coquilles) permettant d'accéder à la variabilité rapide (interannuelle à multiséculaire).

De même, un intérêt croissant pour les échelles régionales est souligné (93 % des réponses). Ces échelles permettent de mieux intégrer la méso-échelle atmosphérique ou océanique en lien avec l'évolution des socio-écosystèmes à l'échelle des territoires. Différents projets de développement des approches systémiques préfigurent une plus grande intégration des questions de climat, environnement et société à ces échelles.

De nombreuses réponses soulignent aussi la plus-value à mieux combiner les données actuelles (instrumentales) et les données P&P. Intensifier les interactions serait bénéfique, à la fois, pour le développement des indicateurs climatiques et environnementaux, l'interprétation des reconstitutions climatiques mais également pour une meilleure intégration des aspects multi-échelles dans l'analyse des évolutions en cours et à venir.

Parmi les nouvelles méthodes et concepts, le développement massif des méthodes statistiques et d'intelligence artificielle reçoit une grande attention pour le développement de reconnaissance automatisée des fossiles, le traitement des séries temporelles ou de données spatiales (images, monitoring...), la modélisation de chronologies ou de phénomènes stochastiques, l'assimilation de données, l'utilisation d'émulateurs et d'apprentissage machine pour interpréter ou améliorer les systèmes prédictifs.

L'ensemble des analyses permet de conclure que les orientations actuelles font une plus grande place à la notion de trajectoires passées intégrant des informations climatiques et environnementales à différentes échelles spatio-temporelles. Les nouvelles directions de recherche ont le potentiel de mieux intégrer des questionnements et résultats issus des périodes pré-quadernaire, quadernaire, holocène et récentes. Elles favorisent des allers-retours entre les échelles locale et planétaire, ou des approches plus systémiques des fonctionnements et des interactions à l'échelle d'un territoire. Ces approches sont essentielles pour remettre la période instrumentale dans le contexte d'un fonctionnement du système Terre avec sa propre inertie.

Ces études abordent également les perturbations des grands cycles planétaires de façon de plus en plus pointue, notamment ceux du carbone, de l'eau et des nutriments, l'érosion de la biodiversité, ou encore la dispersion d'éléments, molécules ou isotopes artificiels et/ou concentrés par les activités humaines. Il en résulte une volonté de faire émerger les sujets ou résultats fortement ancrés dans les besoins de connaissance éclairant les rapports du GIEC ou de l'IPBES, ou une prise en compte plus directe pour éclairer les décisions.

A 3.3 LIEN AVEC LA BIODIVERSITÉ

L'étude de la biodiversité actuelle et passée est devenue un enjeu clef au regard de la crise que nous traversons depuis au moins le début du XX^e siècle. Depuis toujours, les approches de reconstruction des paléoenvironnements se sont nourries d'interactions fortes avec les communautés travaillant sur la biosphère, que ce soit sur des populations fossiles comme sur leurs analogues vivants actuels, et ce, du fait même de la mise en œuvre du principe de base qui nourrit ces reconstitutions : le principe de l'actualisme. Les patrons de distribution et de dynamique de la biosphère relèvent autant de communautés scientifiques travaillant sur le vivant (écologues, botanistes, limnologues, océano-

graphes biologistes, etc.) que de communautés rattachées à la paléontologie (incluant la micropaléontologie).

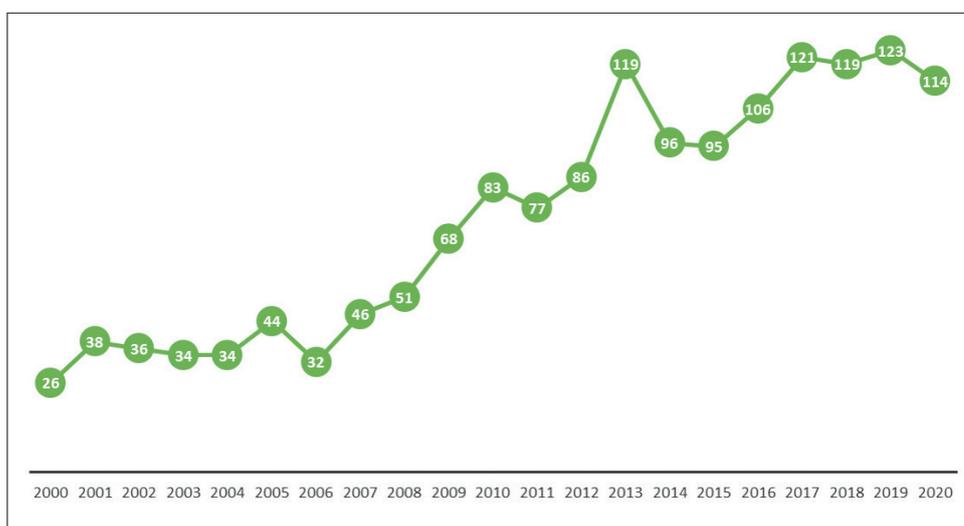
Comme il est mentionné dans la section A 1 (Figure A 1.2), la bibliométrie fait logiquement ressortir une forte proximité entre les mots *paléoenvironnement* et *paléobiosphère*, soulignant un lien direct entre les questions d'évolution des biomes et de leur environnement, traitées à l'échelle écosystémique dans les recherches menées en France. L'analyse bibliométrique met également en avant un renforcement des interactions par une nette augmentation des publications portant la mention biologie ou écologie (Fig.A 3.2), provenant, en particulier, de l'essor de la biologie moléculaire qui offre de nouvelles opportunités pour caractériser les écosystèmes anciens. La synergie entre les deux communautés est historiquement bien établie.

Les consultations (prospectives, questionnaires, réunions régionales) convergent cependant pour souligner que si les interactions sont déjà majoritairement établies entre actualistes et paléontologues (un même chercheur spécialiste d'un groupe taxonomique s'investit souvent sur ces deux aspects), un renforcement des collaborations serait nécessaire autour de questionnements scientifiques communs. Un tel renforcement pourrait être facilité par le partage d'une méthodologie intégrative. On peut citer à ce titre les approches et méthodes de biologie moléculaire, en parallèle de progrès faits sur la caractérisation des populations et de leurs distributions (biogéographie) à différents intervalles de temps.

Du point de vue de l'étude du climat et de l'environnement, un renforcement des interactions avec la communauté travaillant sur le vivant est également jugé indispensable pour :

- améliorer les connaissances sur les patrons et les référentiels de distribution de la biodiversité et sur sa dynamique à différentes échelles de temps ;
- mieux comprendre la granularité des processus et forçages en jeu sur les populations modernes en tant que bio-indicateurs afin d'améliorer la calibration des tra-

Figure A 3.2 - Augmentation du nombre de publications portant la mention biologie ou écologie dans les titres ou les résumés entre 2000 et 2020.



- ceurs une fois fossilisés ;
- connaître les limites statistiques de leur application en tant que paléo-bioindicateurs/proxies ;
- confronter les approches taxonomiques (en micropaléontologie notamment) et les méthodes de détermination spécifique (couplage avec les approches moléculaires) ;
- mieux contraindre les notions d'évolution des communautés et de phylogénie ;
- s'interroger sur les notions de seuil, saut et résilience de la biodiversité.

De plus, une collaboration plus étroite entre écologues et paléocéologues est à même de renforcer la définition des notions de trajectoires, d'héritages (états initiaux) et de seuils qui contraignent l'évolution des écosystèmes à long et court termes.

Plusieurs difficultés à ces collaborations ont été soulignées et doivent être prises en compte dans le futur. Elles peuvent être liées à l'hétérogénéité temporelle des données acquises par chaque communauté scientifique, qui rend difficile les comparaisons. Comme pour de nombreux autres types d'approches multidisciplinaires, l'écoute réciproque est primordiale, ce qui demande aux biologistes et écologues de s'intéresser aux problématiques sur les temps longs, et aux scientifiques de la communauté P&P d'aborder les temps courts en dehors des besoins inhérents aux calibrations des traceurs. Ceci est favorisé actuellement par un besoin de mieux comprendre les effets d'intégration temporelle des différents processus et de les replacer au sein de trajectoires. Ces principaux verrous doivent être levés dans les prochaines années pour mieux bénéficier des complémentarités entre les approches sur l'ancien ou sur l'actuel, notamment dans la caractérisation temporelle et la vitesse des processus à l'œuvre.

A 3.4 LIEN AVEC LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (SHS)

Le croisement disciplinaire entre les thématiques relevant des P&P et celles des Sciences humaines et sociales est bien ancré dans la communauté comme l'attestent les nombreuses publications. Les études embrassent des périodes allant de l'apparition de la lignée des Hominidés jusqu'à la période actuelle, à condition que les échelles de temps et la résolution des phénomènes observés soient compatibles. Plusieurs aspects très différents sont ainsi abordés de façon multidisciplinaire. La forte évolution des publications associées à la thématique « l'Homme et son environnement » en est le reflet.

De nombreux questionnements communs permettent d'envisager un rapprochement encore plus étroit entre les disciplines. Les interactions se jouent à deux niveaux : (1) des questions et méthodologies partagées ou complémentaires et (2) une meilleure appréhension des questions sociétales, qu'il s'agisse d'études P&P en lien avec l'évolution des so-

ciétés ou d'une meilleure appropriation des questions P&P dans les questionnements actuels, et l'éclairage qu'elles apportent sur l'évolution actuelle ou future des sociétés.

En effet, il est reconnu que les études sur les écosystèmes anciens permettent de reconstruire un cadre d'évolution environnementale qui vient compléter les modèles historiques, archéologiques, et anthropologiques sur l'évolution de la lignée humaine et des sociétés passées. Elles apportent un éclairage nécessaire sur l'adaptation socio-économico-culturelle des populations à leur environnement :

- Quelles ont été les pratiques d'exploitation des ressources naturelles, des territoires sous des contraintes changeantes ?
- Quel est le lien entre les changements civilisationnels et environnementaux ?

Depuis leur apparition et de façon de plus en plus prégnante au cours du Quaternaire et jusqu'à l'Anthropocène, les humains sont aussi un facteur d'évolution environnementale. Les résultats sur l'évolution des modes de vie des groupes humains (organisation, économie, mobilité, etc.) nourrissent les problématiques P&P : impacts, anthropisation, usage des sols, agriculture, climat, introduction d'espèces, etc.

Pour une partie de la communauté ces croisements avec les SHS sont naturels, faciles et évidents. Ils sont au cœur de leurs centres d'intérêt quotidiens. À l'inverse, d'autres collègues considèrent ces rapprochements peu réalistes ou artificiels, en particulier lorsqu'ils prennent un caractère d'obligation pour répondre aux besoins d'appels d'offres et lorsqu'il s'agit de sous-communautés P&P trop éloignées de par leurs périodes d'études. Le sentiment, dans ce cas, est que ces constructions demandent d'y consacrer un temps qui n'est pas compatible avec les impératifs actuels de productivité, ou de développements disciplinaires chronophages.

Bien que les interactions soient effectives, il reste de nombreux silos entre les disciplines. Par exemple, il a été difficile d'impliquer les collègues de SHS dans la construction du Livre Blanc identifié par les mots paléoclimats et paléoenvironnements, ce qui indique que le dialogue entre les communautés a encore besoin d'être renforcé. Une réflexion sur le bon niveau d'échange doit certainement être menée pour accroître les synergies sur la base de questions scientifiques communes ou de curiosité partagée. Les calendriers des activités disciplinaires et multidisciplinaires ne sont pas toujours compatibles. Ces aspects sont rarement discutés, et ces incompatibilités peuvent conduire à des incompréhensions. Il semble également que l'organisation et les critères d'évaluation puissent être un frein à certaines activités transverses.

Sur un autre plan, les SHS sont encore trop peu associées aux efforts visant l'engagement sociétal et à l'appropriation

tion par le grand public et par les décideurs des résultats des recherches P&P. Les questions pouvant faire l'objet d'un renforcement des interactions concernent la compréhension de la perception de la relation société-nature, notamment en ce qui concerne les questions de patrimoine et de patrimonialisation, et la place qu'occupent les trajectoires passées dans notre mémoire collective. Les outils et méthodologies spécifiques qui permettraient d'avancer collectivement sur ces questions sont disponibles et sous-exploités.

A 3.5 LIEN AVEC LA SOCIÉTÉ ET LA PRISE DE DÉCISION

Les P&P ont contribué à la prise de conscience, notamment en influençant largement les premiers travaux du GIEC, que l'activité humaine place la société en position de responsabilité vis-à-vis de l'évolution des conditions favorables à la vie sur Terre. Les équipes françaises comptent parmi les fers de lance de ce mouvement mondial. Ces recherches apportent ainsi des éclairages essentiels aux synthèses internationales publiées dans les rapports du GIEC. Malgré le développement des Groupements régionaux d'experts du climat (GRECs), peu de résultats sont cependant retenus pour éclairer les changements régionaux, les impacts et les risques, et un engagement relativement limité de la communauté P&P est observé au regard du potentiel dans cet exercice de synthèse à l'interface science-politique, et du caractère prédictif des travaux P&P.

Alors qu'elles ont une expertise reconnue sur la biodiversité et l'évolution des organismes et des milieux, avec des problématiques de conservation ou de restauration grâce aux états de référence et aux trajectoires, les équipes françaises en P&P contribuent peu aux rapports de synthèse axés sur le vivant tels que les rapports de l'IPBES. De même, les travaux de la communauté semblent peu exploités sur la question des ressources (services écosystémiques, séquestration du carbone, ressource en eau, ressources fossiles - uranium/pétrole, gaz, charbon-, granulats, pierres de construction...) alors que la genèse ou le maintien de ces ressources résulte d'un héritage uniquement appréciable par une approche paléoenvironnementaliste. Le constat est similaire pour les enjeux autour des aléas et risques (érosion, inondations, tempêtes, extrêmes climatiques, transferts sédimentaires, pollution). Les travaux menés par la communauté P&P sur l'évolution des sociétés anciennes pourraient également être davantage pris en compte dans la prise de décision. Les capacités ou réalisations de la communauté apparaissent parfois sous-utilisées alors que les travaux produisent de nombreux indicateurs qui pourraient davantage ruisseler dans la société pour la prise de décision.

Les consultations renvoient une image partagée sur ces questions et font apparaître des tiraillements entre une communauté P&P qui est consciente de son potentiel et des ressentis sur la façon dont les décideurs perçoivent l'apport de la P&P par rapport aux orientations actuelles

et aux besoins d'informations directement utilisables. Cependant, 73% des réponses au questionnaire indiquent un fort intérêt à s'organiser au niveau national pour traiter les questions des changements globaux et apporter une vision originale en s'appuyant sur les axes identifiés dans la figure A 3.1.

Seulement 12% de réponses indiquent que les questions ou les méthodes utilisées sont reconnues pour les études de risques et 25% envisagent de développer des approches pertinentes pour ce type d'étude. Pourtant, la communauté tisse déjà des liens étroits avec de nombreuses structures telles que des Commissions internationales, des Collectivités territoriales (élu(e)s et services), des ambassades, syndicats, services décentralisés de l'état (e.g. DRAC) dans une démarche d'appui aux politiques publiques, vers des opérateurs privés (e.g. EDF), des gestionnaires de réserves ou de parcs naturels en soutien à la conservation ou restauration, et plus largement dans des réseaux d'experts. Il y a donc une sous-estimation du potentiel de ce que les études P&P peuvent apporter à la société sur des questions opérationnelles de durabilité alors que de nombreuses études éclairent directement les rétroactions ou effets croisés à l'intersection des différents objectifs du développement durable.



A4. Financements des projets sur les 20 dernières années

A 4.1 LES SOURCES DE FINANCEMENTS VIA LE PRISME DE LA BIBLIOMÉTRIE

L'analyse bibliométrique permet d'obtenir un premier aperçu des soutiens et des financements de la recherche en P&P, en effectuant le recensement des organismes et des programmes cités dans les remerciements des articles. Il est évident que ce type d'approche est affecté par un certain nombre de biais. En particulier, notre recensement repose uniquement sur le nombre de citations et n'intègre pas les montants budgétaires alloués par les différents guichets. Par ailleurs, l'occurrence des noms d'organismes dans les remerciements n'est pas strictement synonyme de soutien financier même si elle doit constituer une approximation de premier ordre dont on peut tirer des enseignements.

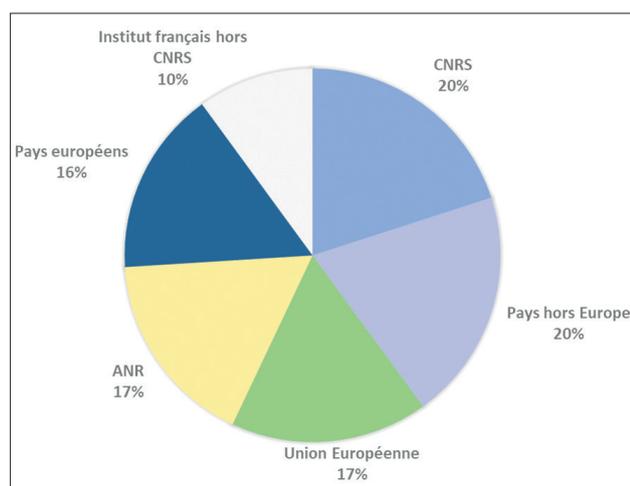


Figure A 4.1 – Proportions des sources de financement principales d'après l'analyse bibliométrique. Les pourcentages ont été obtenus en ne gardant que les 12 sources de financement/soutien principales (>100 publications qui les citent). Ces données ont été regroupées en 6 grandes catégories pour simplifier la lecture de la figure.

Comme le montre la figure A 4.1, le CNRS est l'organisme le plus fréquemment cité dans les remerciements des publications de la communauté P&P. Il semble légitime de penser que cette proportion élevée traduit l'importance du CNRS dans le financement de la recherche *via* ses programmes (eg. Tellus, LEFE) mais également ses aides à la structuration de la recherche (eg. GDR, LIA.) et aux accès aux grandes infrastructures de recherche.

Les données bibliométriques indiquent que, depuis 20 ans, la proportion d'articles co-écrits avec des partenaires étrangers est en augmentation constante pour atteindre 80% des publications en 2020 (voir section A 1). Cela se traduit

par l'importance des projets soutenus par des organismes non-européens (20%) et européens (16%). Parmi les pays hors-Europe, les États-Unis via la NSF sont le financeur principal (10%), et sont suivis par la Chine (~ 5%). Le soutien des pays européens (16%) est largement dominé par le Royaume-Uni (NERC; 8%) et l'Allemagne (DFG; 5%).

En troisième position ex-aequo, on trouve les financements de l'Union Européenne (17%) et de l'ANR (17%), qui permettent de monter des projets de grande envergure pouvant fédérer des équipes importantes, pluri-laboratoires voire pluridisciplinaires. À eux deux, ces guichets contribueraient ainsi à plus d'un tiers des financements et soutiens de la communauté P&P. Ce chiffre important est peut-être biaisé par la plus grande rigueur dans la manière dont ces projets sont référencés dans les remerciements des publications. Pour l'ANR la mention regroupe à la fois les appels à projets blancs, thématiques et génériques, ainsi que les projets relevant des Programmes d'investissements d'avenir (France 2030), comme les Laboratoires d'Excellence (LabEx), les Initiatives d'excellence (IDEX) et ou les Ecoles universitaires de recherche (EUR).

Enfin, l'ensemble des financements issus d'autres organismes ou instituts français (CEA, IRD, MNHN, IPEV, etc.) a été regroupé en une seule entité qui totalise 10% des citations dans les remerciements des publications. Cette proportion peut sembler faible mais, en terme budgétaire, elle masque des modes de soutien variés parfois très coûteux (e.g. prise en charge de la logistique des stations polaires et de l'affrètement jusqu'en 2017 du N/O Marion Dufresne par l'IPEV).

A 4.2 LES SOUTIENS FINANCIERS DES PROGRAMMES DE L'INSU ET DE L'INEE

Les soutiens nationaux sollicités de façon récurrente pour les projets de recherches P&P ont été ciblés pour l'analyse des financements (cf section 3.3.3). Les appels d'offres des instituts du CNRS, INSU et INEE notamment, contribuent à fédérer les recherches entre les laboratoires et les organismes de recherche et constituent l'une des principales sources de financement répertoriées.

Pour l'INSU (figure 4.A 2 et A 4.3), l'analyse s'étend de 2015 à 2020 (voire 2021, 2022 pour certaines actions). Les projets ont été répartis en quatre domaines thématiques distincts : géochimie, paléontologie, modélisation et autres (Sédim./Géol./Paléomag.). Quand un même projet relevait de plusieurs domaines, le montant alloué au projet a été considéré comme également réparti entre les deux domaines, même si cela n'était pas le cas dans la mise en pratique du

projet. Ce bilan montre que la part des soutiens INSU (via actions ciblées Tellus et LEFE surtout, cf. détail ci-dessous) oscille entre 20 et 35% du total des projets soumis par an pour les projets étiquetés P&P.

Pour l'INEE, créée en 2009, l'analyse s'étend de 2014 à 2022. La nature des soutiens financiers est différente et concerne de nombreux projets structurants de type LIA, GDRI, RDN, PICS... Les soutiens rattachés à des approches P&P par ailleurs montrent un fort focus sur le lien avec les communautés humaines; les projets axés sur la paléobiodiversité représentent 30% des projets soutenus.

A 4.2.1 Programme Tellus (INSU)

Le programme Tellus¹⁸ est rattaché au domaine Terre Solide de l'INSU dont deux des actions sont plus spécifiquement sources de financement en P&P: SYSTER¹⁹ et INTERRVIE²⁰.

ensuite la géologie/sédimentologie (28%), puis la modélisation (13%) et la paléontologie (10%).

L'action Tellus-INTERRVIE s'intéresse à l'étude de la Terre Vivante. Il a comme objectif de mieux comprendre les interactions actuelles et passées entre la géosphère et la biosphère et de comprendre comment la Terre et la vie se sont influencées mutuellement au cours des temps géologiques, conduisant au système Terre/vie actuel. Entre 2015 et 2020, 77 projets ont été financés au total, dont 21 qui relèvent de la thématique P&P, soit 27% en moyenne (min 17% en 2015, max 38% en 2019). Sur un montant total alloué aux projets INTERRVIE de 441 k€ sur 6 ans, les projets P&P représentent environ 26% du budget alloué (et 27% du nombre de projets). En moyenne, c'est environ 3,5 projets/an pour 19 k€, soit environ 5700 €/projet/an financés par INTERRVIE. Ce sont principalement la paléontologie (43%) et la géochimie (31%) qui drainent la plus grosse part du bud-

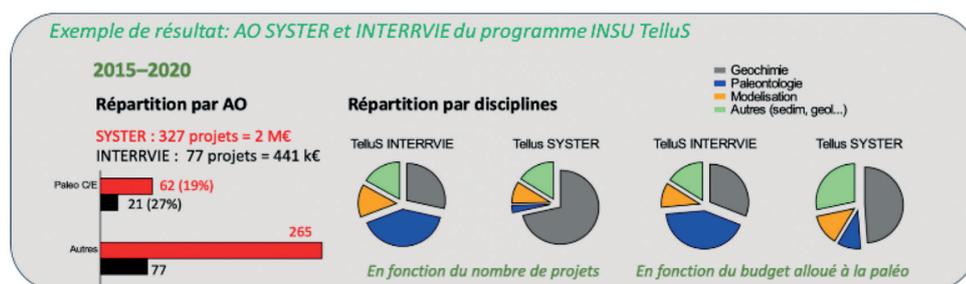


Figure A 4.2 – Bilan des financements sur les AO nationales pour INSU-TELLUS-SYSTER et INTERRVIE.

L'action Tellus-SYSTER s'intéresse à l'identification et à la quantification des processus mis en jeu dans la dynamique de la Terre solide et ses couplages avec les enveloppes externes, ainsi que l'impact de ces processus en termes d'aléas géologiques et ressources, et ce, à toutes les échelles de temps et d'espace. Entre 2015 et 2020, 327 projets ont été financés au total par l'action SYSTER, pour un montant total alloué aux projets SYSTER de 1,99 M€ sur 6 ans. Parmi ces projets, 62 relèvent de la thématique P&P, soit 19% en moyenne de l'ensemble des projets (min 16% en 2018, max 25% en 2015). Néanmoins, les projets P&P représentent moins de 19% du budget total. La thématique P&P représente environ 10 projets/an pour 62 k€, soit un financement d'environ 6200 €/projet/an. Sur la période 2015-2020, la majorité (49%) du budget total alloué à des projets P&P a été orientée vers des projets relevant de la géochimie, viennent

get total alloué à des projets P&P sur la période 2015-2020, viennent ensuite la géologie/sédimentologie (16%) et la modélisation (10%).

Les deux actions financent des projets d'un montant équivalent. Bien qu'INTERRVIE finance moins de projets que SYSTER, la proportion de projets relevant de P&P est plus importante. La géochimie apparaît comme leader des soutiens financiers reçus.

A 4.2.2 Programme LEFE (INSU)

Le programme LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement) est rattaché au domaine Océan-Atmosphère de l'INSU et abrite deux actions qui apportent de forts soutiens aux thématiques P&P: IMAGO et CYBER .

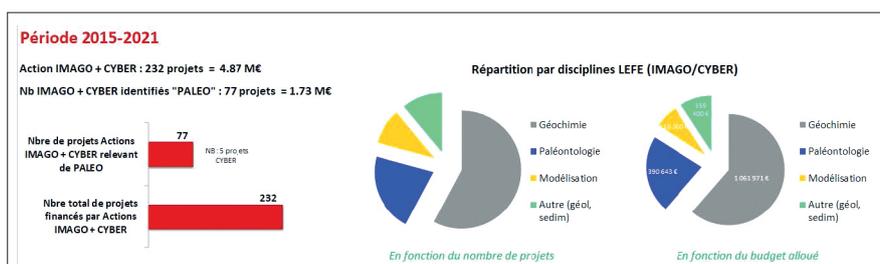


Figure A 4.3 – Bilan des financements sur les AO nationales pour INSU-LEFE-IMAGO/CYBER (2015-2021).

18- <https://programmes.insu.cnrs.fr/le-laboratoire/presentationtellus/>

19- <https://programmes.insu.cnrs.fr/tellus/syster/>

20- <https://programmes.insu.cnrs.fr/tellus/intervie/>

21- <https://programmes.insu.cnrs.fr/le-laboratoire/lefe/presentation/>

22- https://programmes.insu.cnrs.fr/lefe/cs_actions/imago/

23- https://programmes.insu.cnrs.fr/lefe/cs_actions/cyber/

Pour ces actions l'ensemble des projets des 2 actions est regroupé dans la figure A 3.3. Entre 2015 et 2021, 200 projets ont été financés au total, dont 66 qui relèvent de la thématique P&P, soit 34% en moyenne (min 24% en 2015, max 45% en 2020, 44% en 2019). Les analyses plus détaillées faites pour IMAGO permettent de déterminer que les projets P&P représentent en moyenne 38% (min 17%, max 61%) du budget total alloué aux projets IMAGO de >3,8 M€ sur 6 ans. Environ 11 projets pour un montant d'environ 241 k€ sont ainsi financés chaque année, avec cependant une grande disparité sur les montants alloués entre projets dans une même année (e.g. plus de 40 k€ d'écart entre les projets les moins et les plus financés en 2019). Sur la période 2015-2021 l'enveloppe totale allouée à des projets P&P par l'action IMAGO a financé des projets relevant pour 58% de la géochimie, pour 25% de l'étude de proxies (microfossiles, pollens, charbons, etc.), pour 9% de la géologie/ sédimentologie/ paléomagnétisme, et pour 7% de la modélisation. La part des montants alloués à des projets P&P montre une tendance à l'augmentation relative par rapport au budget total de LEFE - IMAGO, qui est lui resté stable, malgré une tendance structurelle à la diminution du nombre de projet soumis au programme LEFE depuis 2017 sur l'ensemble des actions.

A 4.2.3 Projets INEE

Pour l'INEE, la comparaison des soutiens aux GDRs, LIAs ou PICs est faite en faisant la distinction entre des projets rattachés à : *Hommes et pratiques*, *Hommes et dynamiques*, et *(Paléo)Biodiversité*. De nombreux projets INEE structurants (LIA, GDRI, RDN, PICs...) font appels à des approches P&P avec un fort focus sur le lien avec les communautés humaines. Les projets axés sur la paléobiodiversité sont intrinsèquement liés aux thématiques P&P.

En ce qui concerne les PEPS, PICs, PRC, 60 projets ont été financés au total, dont 20 Hommes/pratiques, 16 Hommes/dynamiques et 14 (Paléo)Biodiversité. Pour les LIAs, les financements couvrent 10 LIA, dont 1 Hommes/pratiques, 6 Hommes/dynamiques et 3 (Paléo)Biodiversité. Enfin, les montants alloués aux structurations de type GDRI, RDN concernent 9 projets, dont 1 Hommes/pratiques, 3 Hommes/dynamiques et 5 (Paléo)Biodiversité

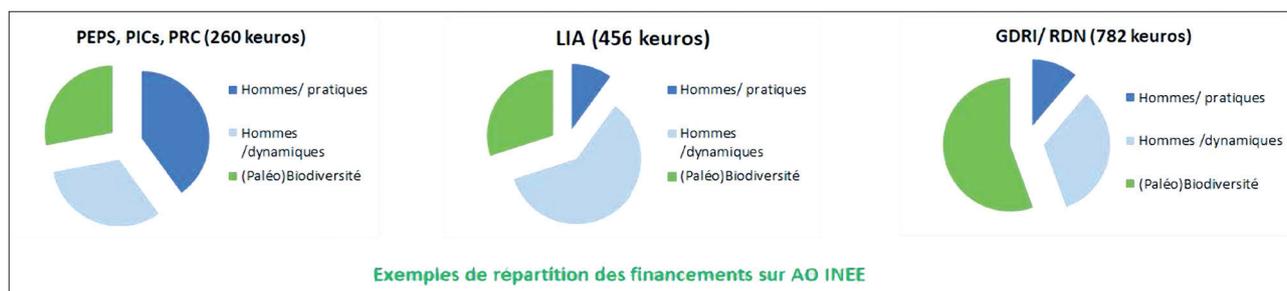


Figure A 4.4 - Bilan des financements sur les AO nationaux pour l'INEE 2011-2022

A 4.3 PROJETS FINANCÉS PAR L'AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE (ANR)

Les remerciements des publications font ressortir l'ANR comme une des sources de financement majeures des recherches P&P (Figure A 4.1). N'ayant pu avoir accès à une granularité fine des contenus des projets dans le temps d'élaboration du livre blanc, l'analyse reste très succincte et incomplète. Elle s'appuie sur un corpus de 150 projets (cf section 3). Les données obtenues sont cependant en accord avec le bilan bibliographique et l'exploitation du questionnaire à la communauté. Le nombre de projets financé sur les thématiques P&P reste stable au fil du temps, avec de l'ordre de 10 projets par an sur les 8 dernières années (Figure A 4.5).

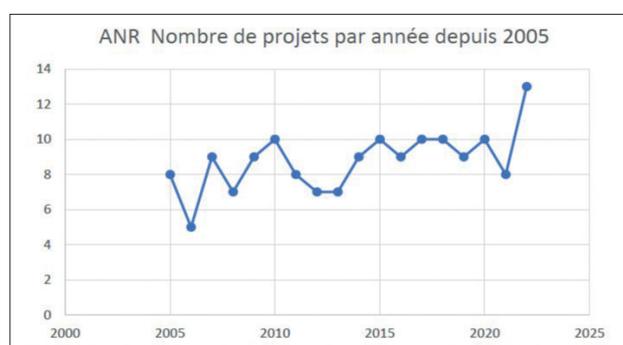


Figure A 4.5 - Évolution du nombre de projets financés par l'ANR (hors investissement d'avenir) entre 2005 et 2022 sur les thématiques P&P.

Il est difficile de suivre l'évolution des thématiques des projets retenus, car les nomenclatures ANR ont changé au cours du temps. Ainsi les cases « projet blanc » et « Projets jeunes chercheurs » de la figure A 4.6 correspondent aux projets entre 2005 et 2010. Pour la période suivante, 7 projets jeunes supplémentaires ont été identifiés et distribués par thématique, ce qui porte à 22 le nombre de projets jeunes chercheurs sur les 150 projets retenus. Les projets se distribuent principalement dans les appels blanc (avant 2011) et génériques. Il y a très peu de projets relevant d'appels d'offres ciblés. La catégories autres projets rassemble 16 projets distribués dans différents thèmes ou types d'appels, ce qui confirme l'aspect fortement multidisciplinaire et varié des études P&P.

Répartition des projets ANR dans les différentes thématiques

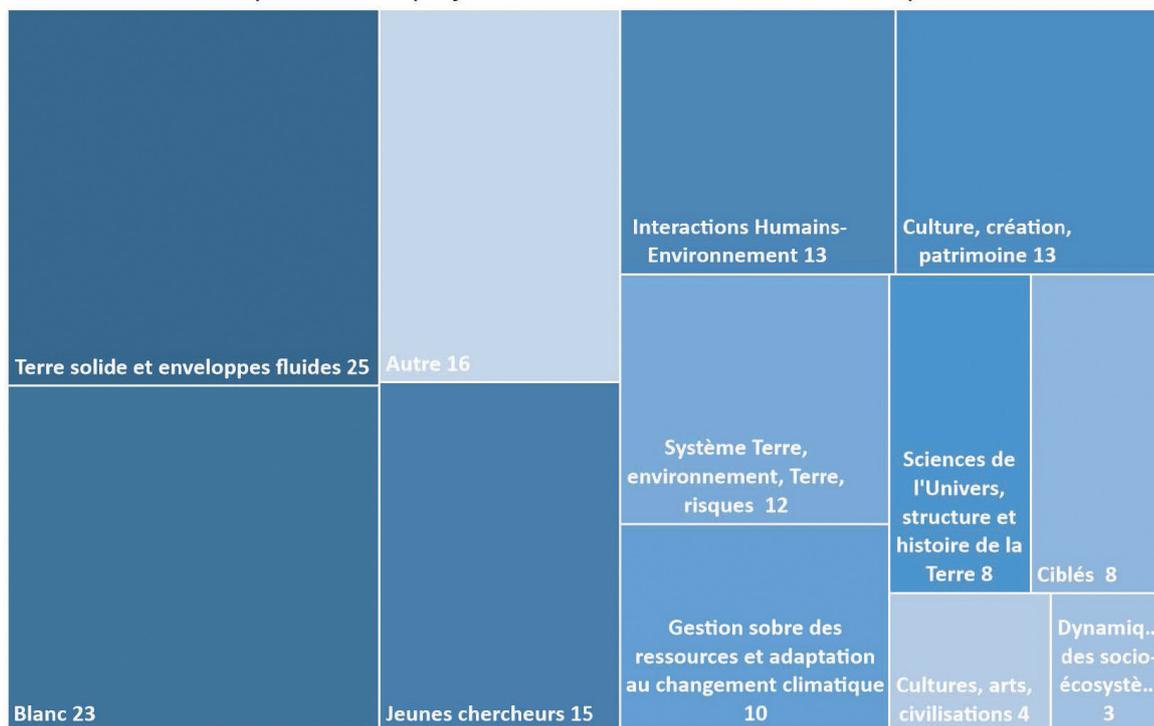


Figure A 4.6 – répartition des projets ANR en fonction des 13 thématiques ayant plus de 6 projets sur la période 2005-2022. Notons que depuis 2011, les projets blancs et jeunes chercheurs sont répartis suivant les axes thématiques. Les projets relevant d'appels d'offres thématiques ciblés sont rassemblés sous le vocable ciblé. Les titres des autres cases correspondent à la classification des thématiques ANR pour l'appel d'offre générique (post 2011)

N'ayant pas l'information sur les mots clefs des projets, il n'est pas possible d'extraire l'évolution du nombre de projet suivant les grandes thématiques identifiées comme thématiques principales P&P en France comme cela a été fait pour la bibliométrie (figure A 1.8). Néanmoins on retrouve les grandes lignes au travers des différents intitulés des projets et les appels d'offres auxquels ils émergent. Le classement suit la nomenclature ANR qui n'est pas directement adaptée aux découpages P&P. Ainsi, à partir des thématiques figurant sur la figure A 4.6 (hors blanc, jeunes chercheurs et autres) on identifie environ 47% de projets relevant du fonctionnement du système Terre, 22% de projets relevant des écosystèmes et de l'adaptation et 31% de projets relevant des interactions avec l'humain et la société.

Le corpus de projets retenus pour cette analyse ne comprend que 46 parmi les 97 projets figurant dans le cahier de l'ANR n°15 « Paléoenvironnements et sociétés humaines » paru en mai 2023. Ce constat est assez cohérent avec le fait que le périmètre P&P est différent et ne prend pas en compte les études pour lesquelles les liens avec les sociétés humaines sont orientés vers les aspects culturels. Les projets communs relèvent principalement des CE27 (Culture, création, patrimoine – axe D.6, 12 projets sur 13 projets

dans cette thématique) et CE03 (Interactions humains-Environnement- axe 8.1, 11 projets sur 13 projets P&P recensés).

D'autre part nous notons une diversification dans les types d'appel d'offre. Un exemple récent est l'AO ESDIR (Exploitation scientifique des données des infrastructures de recherche), permettant de financer depuis 2021 des projets ANR en vue de l'exploitation des campagnes de carottages des navires de la Flotte Océanographique Française.

L'ANR gère également Programmes d'investissements d'avenir (France 2030) pour lesquels il est difficile de déterminer la part de projet P&P dans la plupart des cas, mais qui apporte du soutien aux travaux de recherche et aux infrastructures. Notons aussi le récent financement des PEPR. Dans ce cadre 2 PEPR exploratoires relèvent pour parties: le PEPR TRACCS: TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques (CNRS, Météo-France), , bien que les thématiques P&P ne figurent pas en tant que telles, et le PEPR Origins: Origines, des planètes à la vie – ruptures technologiques, sociétales et épistémiques (CNRS). Cependant il est trop tôt pour pouvoir évaluer l'impact de ces programmes sur la communauté P&P.

A 4.4 LES SOUTIENS FINANCIERS INTERNATIONAUX

Pour rappel, les synthèses ne concernent pas l'ensemble des sources de financement à l'international. Il a également été difficile d'obtenir un détail suffisant sur les projets pour les attribuer (ou à défaut les relier) sans confusion aux thématiques P&P (cf. section 3).

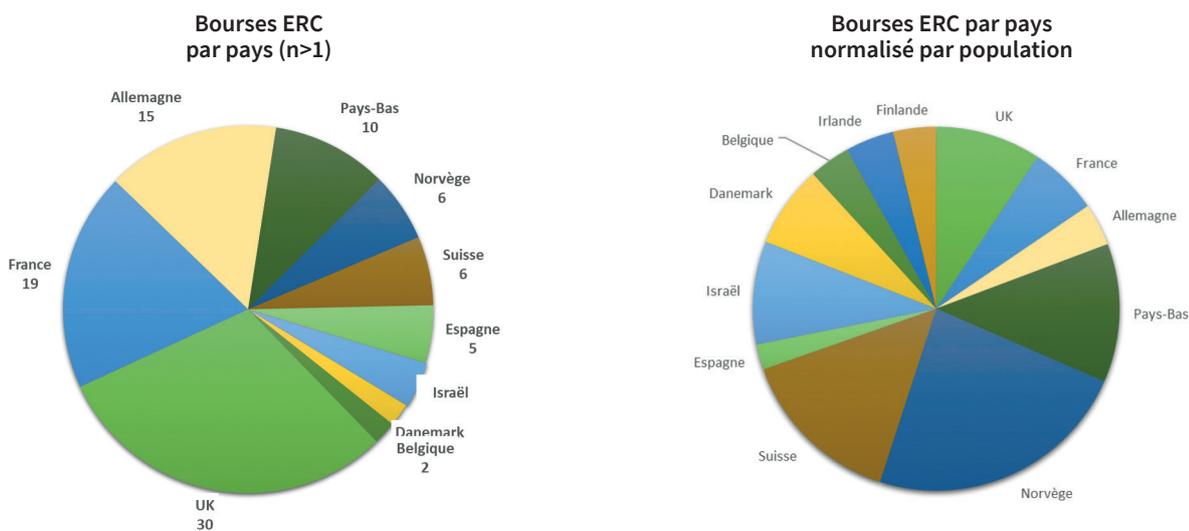
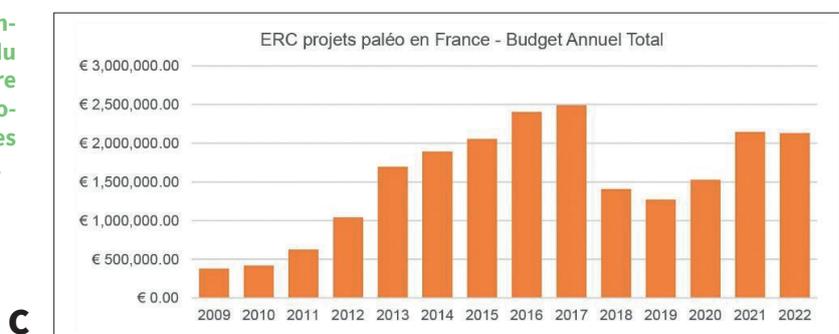


Figure A 4.7 – Bilan des AO ERC. A et B indiquent respectivement la répartition du nombre de bourses ERC par pays, en nombre total et au prorata de la population. C) évolution du budget annuel total obtenu par les projets paléo en France entre 2009 et 2022.



A 4.4.1 L'ERC

L'analyse faite pour l'ERC s'étend de 2009 à 2022 et concerne le soutien apporté par les programmes de subventions « Starting », « Consolidator » et « Advanced ». Les projets P&P ont été identifiés comme étant des projets de recherche portant sur l'évolution des systèmes terrestres et écologiques et sur l'évolution humaine.

En termes de financements pour les projets P&P, la France est en seconde position, après le Royaume-Uni. Elle arrive en septième position lorsque le nombre de projets est pondéré en fonction de sa population, les deux premiers étant la Norvège et la Suisse (Figure A 4.7). Les succès des projets l'ERC accueillis dans des laboratoires français ont connu un pic dans les années 2016-2017 suivi d'un fort déclin (Figure A 4.7). On note une reprise depuis 2021 dans le montant des financements, certainement lié à un meilleur accompagnement et une meilleure préparation des porteurs de projet mis en place par les différents organismes de recherche.

A 4.4.2 Le programme européen H2020 et les actions Marie Sklodowska-Curie

Pour les programmes H2020 et les actions Marie Sklodowska-Curie, nous avons eu accès uniquement à la banque de données du CNRS-INSU (cf section 3) et ne produisons qu'une analyse très partielle.

Pour cette base de données, sur 147 projets H2020 financés entre 2014 et 2020, quatre l'ont été dans des thématiques se rattachant à P&P, tous les quatre dans le programme « changement climatique » (1 en 2016 et 3 en 2018). Ces données montrent la très faible attribution de projets dans le domaine P&P sans que nous sachions si cela est en lien avec l'augmentation du nombre de propositions initiales déposées. Le CNRS est leader pour 2 de ces projets et partenaire pour les 2 autres. Ces résultats reflètent qu'il y a peu d'appels à projet de type H2020 où peut candidater la communauté P&P. Une des raisons est que le le programme changement climatique est principalement focalisé sur le présent et le futur, alors qu'il y a de nombreuses questions pour lesquelles un éclairage paleoclimatique ou paléoenvironnement serait pertinent.

Comme pour les programmes H2020, nous n'avons que les données venant de porteurs CNRS pour les actions Marie Sklodowska-Curie. Sur 49 projets retenus 9 sont en relation avec la thématique P&P entre 2014 et 2020, avec des chiffres globalement constants: 2 en 2014, 2 en 2015, 1 en 2017, 1 en 2018, 1 en 2019, 2 en 2020.

Ces constats indiquent une présence relativement faible de la communauté P&P sur les projets européens. Ils sont cohérents avec l'analyse faite sur les liens avec la société qui montre une sous-estimation de la communauté P&P en France du potentiel de ses études vis-à-vis des questions ac-

tuelles sur le changement climatique ou les changements globaux. Les évolutions climatiques ou environnementales dans la période actuelle ou le futur constituent en effet la base de réflexion de ce type d'appel d'offres. Il aurait été intéressant de pouvoir déterminer si le faible nombre de projets est dû à un fort taux de rejets ou à un manque de soumission.

A 4.4.3 ICDP et IODP

Les questions d'accès à ICDP et IODP sont traitées dans la section A 2 (Infrastructure). Nous rappelons ici que la participation à ces campagnes de forages nécessite de trouver des financements complémentaires. La situation est différente entre le continent et l'océan, mais nécessite une réflexion pour favoriser les participations des équipes françaises et bénéficier pleinement des moyens disponibles.

Pour ICDP, seuls 20% du coût des forages sont financés (avec max env. de 2 M€), ce qui laisse aux porteurs de projets la charge de trouver une part majoritaire de la somme à engager pour le soutien à la recherche ou les supports RH (e.g. CDD, doctorat ou post-doctorat). Cette difficulté de financement est identifiée comme un frein aux montages de demandes. Ainsi, les forages peu profonds (et donc moins coûteux) sont majoritaires, au détriment des projets P&P plus profonds souvent nécessaires pour étudier les temps longs.

Pour IODP, un meilleur accompagnement financier est proposé aux équipes, en particulier pour le soutien aux expédition (billets d'avion...), pour les analyses post-campagnes ou des demandes de bourses postdoctorales. La partici-

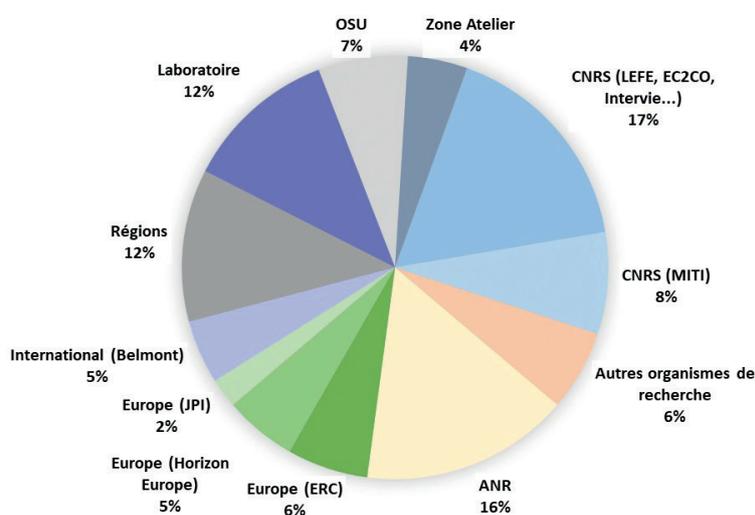
pation relativement frileuse de la France par rapport à des pays ayant une communauté P&P équivalente tient en partie, comme pour ICDP, à l'investissement lourd en temps pour la préparation et la participation à ces campagnes. L'accompagnement des chercheurs et des équipes et, tout particulièrement, celui des enseignant-chercheurs qui souhaiteraient s'impliquer dans l'organisation et la gestion de campagnes, est un élément essentiel pour renforcer les participations françaises.

A 4.5 LA RÉPARTITION DES FINANCEMENTS

L'analyse des sources et soutiens de financements, des réponses au questionnaire soumis à la communauté et des retours récoltés à la faveur de discussions ouvertes lors des réunions organisées au niveau régional et national, montre que globalement les ressources sont utilisées de façon optimale par la communauté P&P.

Au niveau national, l'analyse en grands axes de recherches des projets INSU fait ressortir une disproportion des financements vers un soutien majoritaire à des approches basées sur la géochimie. Certaines sous-thématiques devraient être plus encouragées. L'analyse des projets ANR fait ressortir une part plus importante de projets sur les thématiques liant paléoclimat, paléoenvironnement, évolution et société que ce qui est issu de l'analyse bibliométrique. Au niveau de l'Europe un déficit est constaté pour les projets européens de type H2020, certainement lié aux objectifs des appels correspondant. L'accès aux financements ERC semble en meilleure adéquation avec les approches P&P car répondant mieux aux aspects fondamentaux de la plupart des projets P&P.

Figure A 4.8 – Appels d'offres privilégiés pour les thématiques P&P d'après les réponses au questionnaire.



Il est intéressant de croiser les résultats de l'analyse bibliométrique et des appels d'offres avec les réponses au questionnaire adressé à la communauté. Les trois approches sont globalement cohérentes quant à la part respective des financements provenant des différentes sources : proximité (laboratoires, OSU), national (CNRS, ANR) et européen. Les réponses à la question sur les choix de privilégier certains types d'AO mettent en avant les sources de financement issus des laboratoires, des régions, du CNRS et de l'ANR. La prédilection pour certains AO se justifie majoritairement et logiquement par le fait qu'ils offrent un bon équilibre entre temps des montages des projets / taux de réussite. Il est aussi relevé que les thématiques des appels d'offres avaient généré un tournant dans les questionnements scientifiques des porteurs et partenaires. L'aspect très chronophage et élitiste des projets à forte enveloppe budgétaire comme les projets ERC ou H2020 est un frein ressenti par tous. Il est nécessaire d'assurer un meilleur accompagnement des équipes vers ces financements et dans la prise en charge de la coordination des projets lorsqu'elles en ont le potentiel. Les réponses soulignent l'importance des soutiens de moindre ambition ou récurrents : obtenus rapidement (mais non moins facilement), ils alimentent tout autant la richesse des recherches P&P.

Les analyses du groupe financement et les consultations font ressortir aussi certaines difficultés. On note en particuliers le poids que fait peser sur le fonctionnement de la recherche la multitude de guichets qui fragmentent les recherches P&P dans un système où le financement se fait essentiellement sur projets. Bien qu'il y ait des ressources, le soutien obtenu est en accordéon, ce qui dessert la recherche fondamentale pour les sujets demandant des perspectives de long terme et des financements récurrents associés. Cet aspect « sur projets » peut également engendrer une disparité dans la communauté avec un fonctionnement à plusieurs vitesses suivant les thématiques. La difficulté de financer des ETP non permanents (doc, postdoc, master) a aussi très souvent été remontée. Il est également primordial de rester vigilant sur l'adéquation entre besoins de campagnes/missions terrain et besoins d'analyses. Une partie des constats n'est pas propre à la communauté P&P. Ils sont néanmoins exacerbés par l'aspect fortement multidisciplinaire des P&P qui cumule de ce fait les différentes difficultés et le nombre d'appels d'offres et interlocuteurs pour les questions de financement, et ce, que ce soit pour des projets nécessitant des financements d'envergure ou des projets assurant le fonctionnement des équipes.



ments effectués en salle (cours magistraux en amphithéâtre ou travaux dirigés), les « camps de terrain », ou encore pendant les stages de recherche que chaque étudiant de master doit valider pour obtenir son diplôme. Ces stages sont proposés, pour une période allant de 5 à 7 semaines pour la première année, et pour une durée allant de 5 à 6 mois pendant la seconde année. C'est au cours de ces stages, directement effectués au sein des laboratoires liés aux formations, que l'apprentissage des futurs acteurs en P&P se renforce.

Comme pour les licences, en fonction du campus, les masters présentent des spécificités particulières. Il existe ainsi, par exemple, des mentions « Sciences de la Terre et des planètes, Environnement » –STPE-Sciences des Océans et de l'Atmosphère –SOA-, Sciences de la Mer, avec des parcours distinctement identifiés (exemple « Sédimentologie et Paléocéanographie »). À équivalence de niveau d'étude, l'obtention d'un master peut se faire par la voie universitaire, mais est également proposée aux étudiants inscrits dans les écoles d'ingénieur. Des étudiants inscrits, par exemple, à l'École Normale Supérieure (ENS) (à Paris, Lille, Lyon, etc.), parmi d'autres grandes écoles, ont un master à l'issue de leur formation. À ce titre, ils doivent effectuer le même type de stage que dans le cursus académique, et ceux qui sont intéressés par les disciplines des P&P se retrouvent dans les mêmes laboratoires que les étudiants issus des parcours universitaires.

A 5.1.3 Doctorats

Les étudiants détenteurs d'un master, et désireux de suivre un doctorat, doivent désormais s'inscrire à un concours proposé dans chacune des écoles doctorales. Les offres de thèse sont éditées par ces écoles doctorales sur leurs sites internet et deux types de recrutements sont possibles: (i)

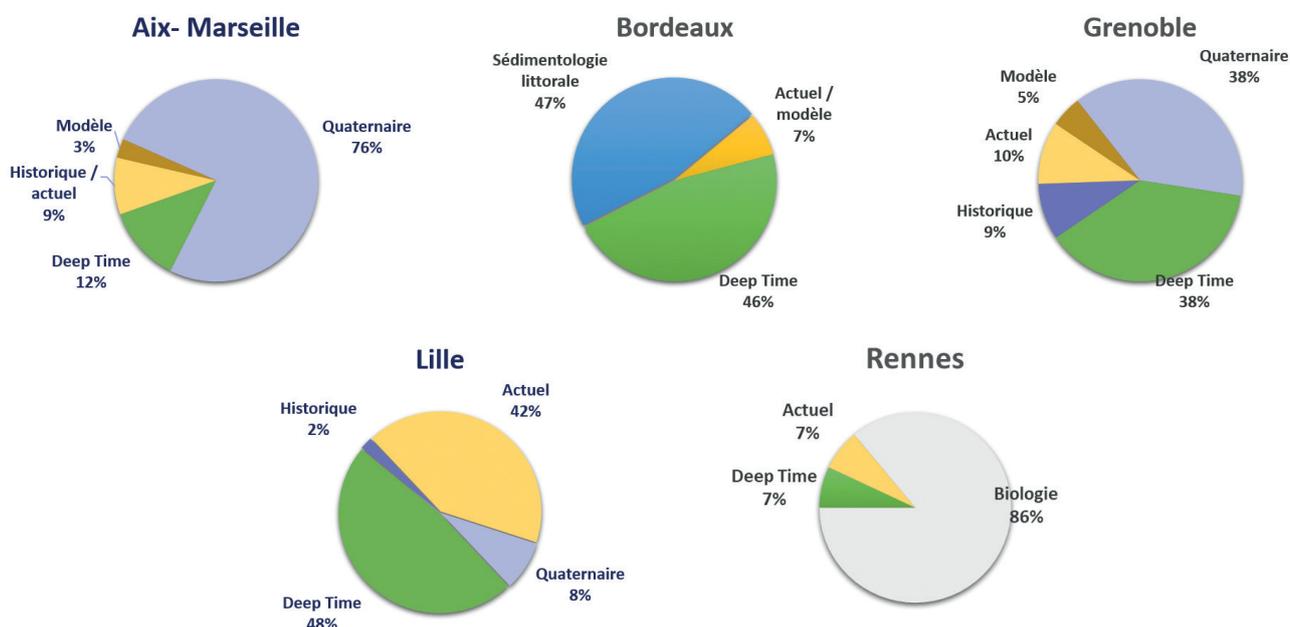
des recrutements pour lesquels les financements (dont le salaire) sont déjà en partie acquis (ANR, ERC, etc.) et seul l'étudiant concourt pour l'obtention de la thèse, (ii) et des recrutements pour lesquels le sujet et le candidat doivent passer la barrière d'une sélection. Le pourcentage de réussite est différent en fonction de chaque école doctorale. Un sondage a été réalisé auprès de cinq grandes écoles doctorales pour avoir une vision, même partielle, des thématiques des travaux de thèse réalisés en sciences de la Terre sur les 10-15 dernières années (figure A 5.2).

Le résultat de ce sondage s'appuie sur un échantillonnage restreint de l'offre de formation à l'échelle nationale, mais permet de montrer que, dès la licence, les spécificités de chaque parcours se retrouvent dans la répartition des thématiques abordées dans les doctorats.

Les doctorants obtiennent de majoritairement des contrats postdoctoraux dans les 1 à 3 ans après leur diplôme. Au bout de 3 ans, certains continuent dans des contrats postdoctoraux (environ 16%), les autres sont embauchés, en moyenne, comme suit (figure A 5.3):

- 1- au sein des Universités (~12%), en tant que maîtres de conférences;
- 2- au sein des différents laboratoires (~17%) en tant que chercheurs;
- 3- au sein des différents laboratoires (~10%) en tant qu'ingénieurs de recherche (ou autres);
- 4- au sein d'autres instituts/organismes non académiques (~19%).

Figure A 5.2 - Répartition des thématiques principales des thèses rattachées à cinq grandes écoles doctorales régionales.



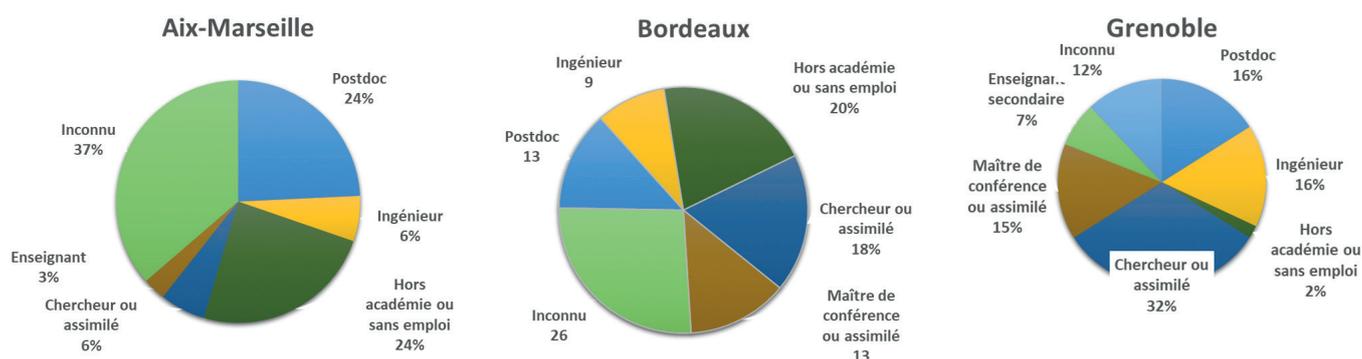


Figure A 5.3 – Camemberts montrant la répartition des débouchés professionnels des doctorants issus de trois écoles doctorales.

Près d'un quart des anciens doctorants n'a pas gardé de contact après la soutenance de leur thèse, et ne sont donc pas pris en compte dans les statistiques précédentes.

La plupart des recrutements concerne des thématiques de recherche visant à améliorer la connaissance pour différentes périodes de temps très récentes. Un volet non négligeable des recrutements concerne l'utilisation et la maîtrise des modèles numériques de climat, impliquant souvent (mais pas exclusivement) les étudiants issus des écoles d'ingénieurs.

Les réponses au questionnaire adressé à la communauté font état des difficultés de recrutement de nouveaux étudiants en P&P liées (1) à des formations inexistantes (cf. *supra*); (2) au niveau des étudiants; (3) à l'absence de formation à l'interdisciplinarité pourtant nécessaire pour aborder les questions P&P. La crainte majeure est la baisse d'attractivité pouvant mener à la perte de compétences, de savoir-faire et de savoirs, de visibilité, pouvant conduire à l'abandon de certaines disciplines qui sont importantes pour les chantiers majeurs des prochaines années. Certaines communautés, notamment les plus naturalistes, se sentent particulièrement vulnérables et menacées.

L'attractivité est affectée par le manque de postes pour les jeunes docteurs, dans un cursus qui relève bien souvent du parcours du combattant, avec une compétition exacerbée et des parcours de plus en plus risqués. La difficulté d'obtenir des financements non seulement pour les thèses mais également pour les gratifications de stages est aussi évoquée dans la fragilisation des filières de formation. Enfin, la faible attractivité des métiers des P&P est également la conséquence des faibles débouchés hors milieu académique ou de leur méconnaissance par les étudiants. L'insertion professionnelle est difficile.

Dans le questionnaire, la moitié des collègues insiste également sur le besoin de nouvelles formations en préparation de nouveaux métiers, que ce soit pour aborder les nouvelles questions scientifiques ou intégrer différents services ou la

formation en environnement devient de plus en plus critique pour aborder les changements en cours et le déploiement de solutions adaptées.

A 5.2 RECRUTEMENTS

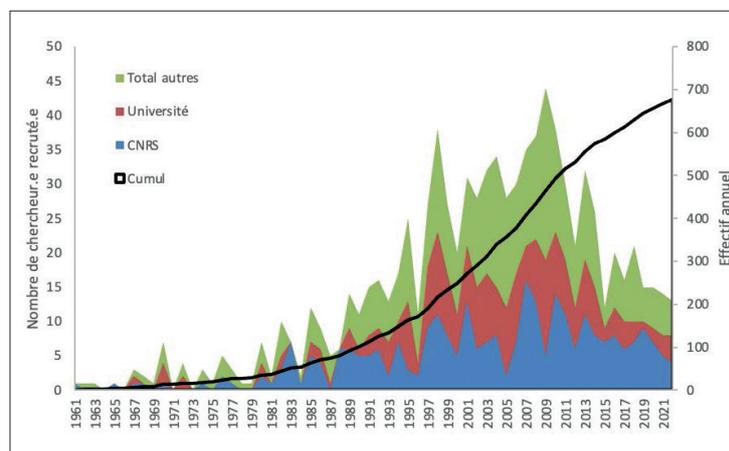


Figure A 5.4 – Estimation des effectifs et de l'évolution des recrutements P&P au CNRS, dans les universités et autres établissements de 1961 à 2022.

L'analyse de l'évolution des recrutements est limitée par le fait que nous disposons d'informations sur les dates de recrutement ou dates de départ pour 677 parmi les 819 collègues recensés. Les données recueillies indiquent que les recrutements dans le domaine des P&P augmentent depuis 1961 pour parvenir à un maximum en 2010 puis chuter (Figure A 5.4). Un maximum de 40 recrutements par an, tous établissements confondus, est enregistré en 2010. Il est notable que la forte augmentation est due pour 2/3 au nombre de recrutement plus élevé dans les universités et les organismes autres que le CNRS.

En 2023, l'effectif est estimé à 700 personnes. La figure A 5.5 permet de comparer le total de recrutement P&P au CNRS (toutes sections confondues) avec le nombre de chercheur (toutes disciplines confondues) dans les sections dans lesquels les chercheurs P&P sont majoritairement recrutés. Le nombre total de recrutement P&P décroît, mais il en est de même pour le nombre de recrutés dans les différentes sections. Cette figure indique que la tendance à la baisse entamée vers 2009 semble structurelle et non liée à la discipline.

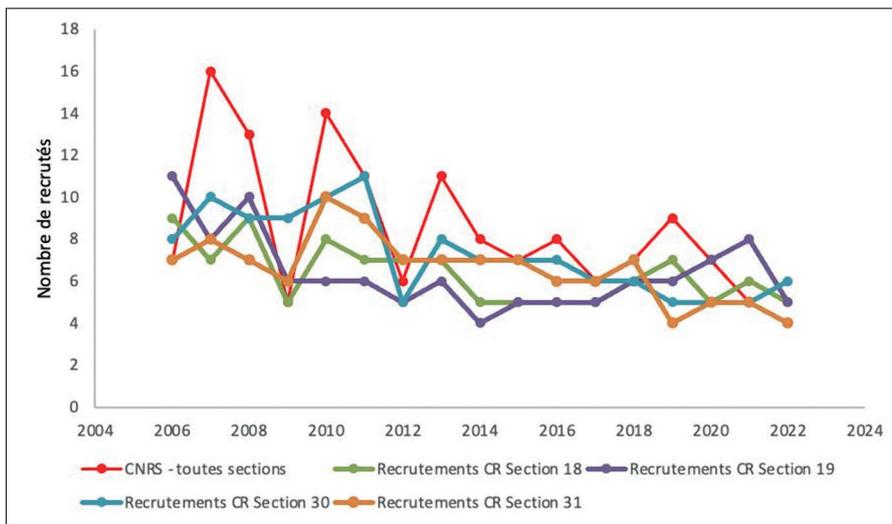


Figure A 5.5 – Évolution comparée des recrutements P&P au CNRS (courbe rouge) et de tous les recrutements (toutes thématiques confondues) dans les sections 18, 19, 30 et 31 qui contribuent majoritairement aux P&P depuis 2006 (source : <https://www.soundofscience.fr/cnrs-hiring-total.html>).

L'évolution annuelle des effectifs (cumul des recrutements – départs à la retraite) est biaisée car (1) il manque beaucoup de données sur les départs à la retraite (64 dates de fin d'activité confirmées); (2) il existe des pionniers qui ont œuvré avant 1961. Néanmoins, elle informe sur la dynamique long terme de la communauté et pose la question de la démographie et de l'impact des départs à retraite à venir (non quantifié du fait de la qualité des données). Il faut s'attendre à devoir anticiper les recrutements pour compenser les départs à la retraite d'ici 5 à 10 ans pour pouvoir garder une activité P&P au niveau de ce qu'elle est aujourd'hui.

La question de la disparité de genre dans la communauté P&P est abordée au travers de la figure A 5.6. La part des chercheuses dans la communauté P&P n'a cessé de croître depuis les années 80 et 90 mais semble atteindre un plateau au début des années 2000, pour n'atteindre que 35,9% en 2022. Cette valeur est inférieure à la part des femmes dans les administrations françaises (40,2%), mais légèrement supérieure à la part des chercheuses au CNRS en 2019 (35%).

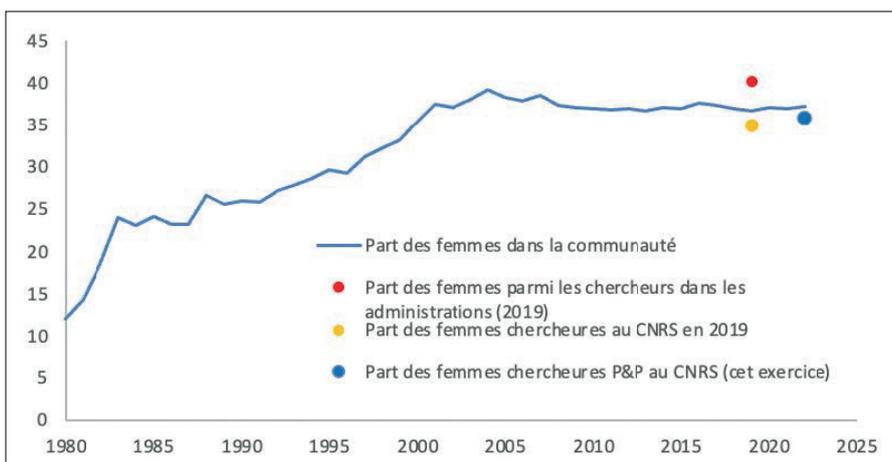


Figure A 5.6 – Évolution de la part des chercheuses dans la communauté P&P comparée à la part des femmes parmi les chercheurs des administrations (2019), à la part des chercheuses au CNRS (2019) et à la part des chercheuses en P&P au CNRS (2022, cette étude).

A6. Synthèse des forces et faiblesses

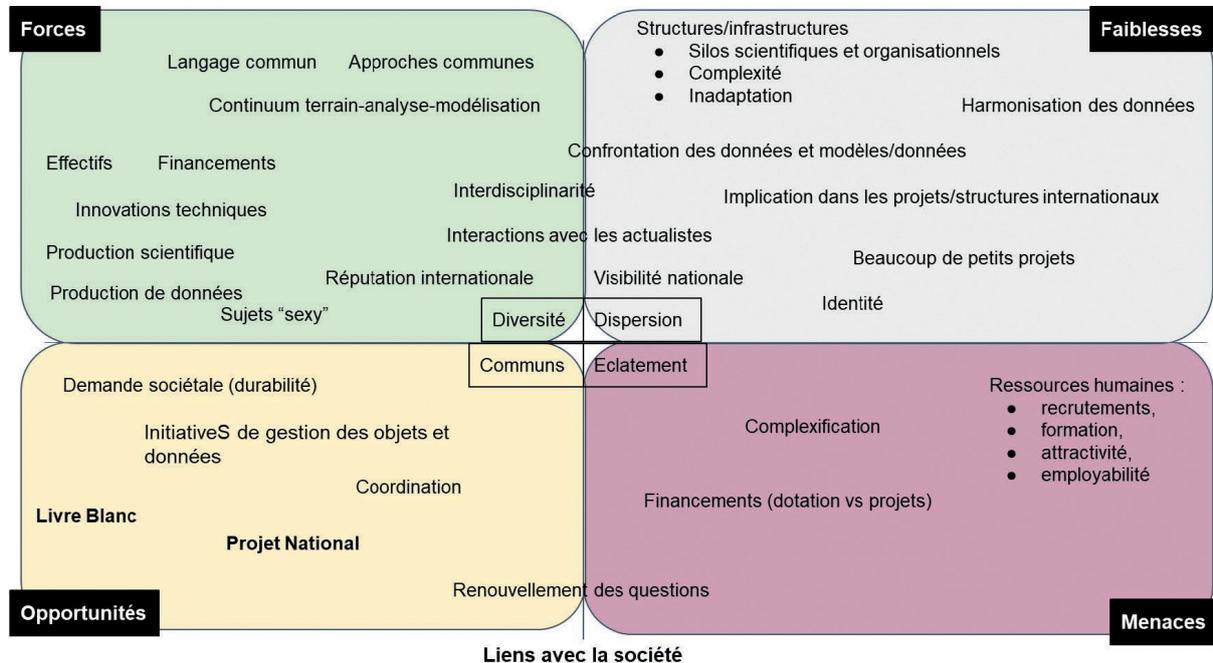


Figure A 6.1 – Analyse swot de la communauté P&P en France.

L'analyse SWOT (Figure 4.6.1) rassemble les principaux atouts et points de vigilance émanant des différentes sections de l'état de lieu des activités P&P en France. Ils sont à prendre en compte pour établir les grandes orientations scientifiques, techniques et humaines des prochaines années.

Une des conclusions émanant de l'analyse de l'état de lieux de la communauté P&P en France est que cette communauté est très large (~700 personnes en 2023). Ses travaux concernent l'étude des expériences passées du système Terre qui sont nécessaires à la compréhension de l'état actuel du système et de sa trajectoire future. Malgré la diversité d'approches méthodologiques et de sujets considérés, elle s'identifie en tant que communauté *via* un vocabulaire commun et des approches partagées ou complémentaires.

Une partie des forces vient de la capacité à combiner des approches de terrain, analytiques et de modélisation intégrée permettant des rétro-observations de l'environnement, l'intégration d'une vaste gamme d'échelles spatio-temporelles et la compréhension des multiples facteurs ayant façonné et façonnant encore les caractéristiques du climat et de l'environnement et leurs évolutions, qu'elles soient lentes, résultant d'événements abrupts, de points de bascule liés ou non à de grandes crises environnementales. C'est une communauté dynamique qui obtient de nombreux financements, produit un volume conséquent de résultats qui participent à un nombre très significatif de publications scientifiques. À ce titre, la communauté P&P française bénéficie

d'une forte réputation internationale, peut-être plus grande que sa visibilité nationale.

Les développements méthodologiques (prélèvements, analyses, instrumentation, modélisation, etc.) induits par les questions scientifiques sont un levier important en termes d'innovations. La qualité et quantité des données produites sont remarquables mais souffrent d'un manque d'harmonisation et ne sont pas encore pleinement exploitées dans les comparaisons données-modèles. Les initiatives multiples de gestion des objets et données devraient permettre à la communauté de faire un saut qualitatif dans ce domaine.

Malgré un vocabulaire partagé, la communauté des P&P ne semble pas avoir d'identité propre. Elle est plutôt la synthèse de sous-communautés qui ont leur propre identité ou qui se réclament d'autres communautés (géochimistes, palynologues, géoarchéologues, etc.). Le défaut d'identité est aussi la conséquence du cloisonnement en silos (disciplinaires, thématiques, temporels, spatiaux) déploré par la quasi-totalité des collègues. Deux cloisonnements sont plus particulièrement mis en relief: (1) Quaternaire-Deep time (en lien avec présence/absence des sociétés humaines) et (2) spécialistes des processus de la période actuelle-paléo. Ces cloisonnements ont forgé et résultent de la structuration de nos instances. En favorisant sa dispersion, la complexité du paysage et des structures ne répond pas aux besoins de la communauté.

Il pourrait être argumenté que cette (sur-)structuration serait le gage d'une meilleure préparation à des projets internationaux. Mais le constat est qu'elle arme mal la communauté qui reste peu active dans ce domaine au regard de son potentiel. Une large partie de la communauté se replie sur les petits projets à l'échelle nationale ou infra-nationale sur des financements proposés dans des myriades de structures. Le modèle de financement actuel risque d'amplifier la tendance à la dispersion et aux trop nombreux cloisonnements, amenant la dilution des énergies et des idées. Un effort de coordination important doit être réalisé dans les années à venir au risque de l'éclatement de la communauté. C'est tout l'ambition de ce Livre Blanc, à la condition que cette coordination n'augmente pas l'enthalpie du système.

Certaines sous-communautés se considèrent fragiles. La course analytique (géochimie s.l.), les ressources déployées sur l'observation, le développement de la modélisation, les départs en retraite ont réduit la part des naturalistes dans la communauté. Cette perte d'expertise pourrait faire courir le risque à terme, de disposer d'analyses très pointues sur des objets (biologiques, minéraux...) mal identifiés. De manière plus générale, l'inquiétude de la communauté est systématiquement focalisée sur les ressources humaines et financières. Par définition, la communauté s'inscrit dans le temps long de la recherche et a besoin de garanties sur des financements récurrents (dotations vs projets) et des ressources humaines pérennes. Il est nécessaire de garantir l'emploi dans ces thématiques et de l'anticiper en assurant la formation des futurs recrutés, l'attractivité des métiers, et l'employabilité des personnels formés.

La multitude d'approches et de questions scientifiques traitées par la communauté P&P est assurément la conséquence d'une très forte interdisciplinarité. Cette dispersion (et transversalité dans les questions abordées) peut être considérée comme une menace mais la richesse qu'elle procure à la communauté permet un renouvellement constant des questions scientifiques. Elle rend en conséquence le positionnement difficile et demande de porter une attention aux adéquations entre les calendriers disciplinaires et multidisciplinaires pour garantir une synergie autour d'axes de recherche partagés à l'échelle nationale.

Malgré la multitude de sujets considérés « attractifs » ayant le potentiel de faire rêver, la communauté P&P estime que ses travaux sont peu visibles du grand public. Il s'agit sans doute d'une sous-estimation de l'impact réel des travaux, peut-être liée à la diversité des sujets, au manque d'information sur l'ensemble des travaux de vulgarisation et communication, et, au fait, que l'impact collectif des actions menées reste sous-estimé. La communauté fait également le constat que les résultats et l'expertise acquise pèsent peu dans le débat public et la prise de décision, alors que les questionnements s'inscrivent naturellement dans une demande sociétale forte sur les sciences de la durabilité. Cet aspect est à prendre en compte dans la façon de concevoir

les liens entre les recherches P&P. Il s'agit pour l'avenir de ne pas seulement considérer les résultats P&P comme une mise en perspective des changements actuels, mais comme une source d'information primordiale pour anticiper les risques associés aux changements climatiques et environnementaux, et aux potentiels effets en cascade pouvant être induits par des mesures d'adaptation ou d'atténuation sur le fonctionnement du climat et des écosystèmes du système Terre.

La multiplicité des approches, zones et temporalités d'études, amène implicitement à la volonté de comprendre la dynamique du système terrestre (englobant tous ses composants) dans une vision holistique à la fois globale, très résolue spatialement et temporellement, et dans laquelle l'ensemble des processus et phénomènes s'imbrique en prenant en compte une très grande diversité de variables. C'est le projet collectif très ambitieux que les différentes consultations menées pour établir ce livre blanc fait émerger et qui mobilise la communauté pour les années à venir. Les fortes interactions répertoriées entre les laboratoires concernés sont le garant de la faisabilité sous réserve que les moyens techniques et humains et l'organisation à l'échelle nationale permettent un accompagnement à la hauteur des ambitions.

LIVRE BLANC

PALÉOCLIMATS ET PALÉOENVIRONNEMENTS

B

Prospective



Préambule

Les recherches sur la compréhension de l'évolution du climat et de l'environnement sont à l'avant-garde pour relever certains des plus grands défis environnementaux, scientifiques et sociétaux du monde actuel. Les changements en cours sont inédits sur des milliers, voire millions d'années, suivant les indicateurs environnementaux considérés. Au-delà des effets du changement climatique et des questions d'atténuation ou d'adaptation, de nombreuses questions émergent sur des effets croisés avec d'autres enjeux environnementaux concernant, par exemple, l'évolution des écosystèmes, de la biodiversité ou encore l'accès aux ressources en eau, à la nourriture et à l'énergie. Malgré la nature critique des travaux sur la période actuelle, les constats et recherches sur les trajectoires climatiques et environnementales récentes illustrent mal les états du système auxquels nous pourrions potentiellement nous attendre dans le futur. Les pressions environnementales imposées par les activités humaines, mais également la nature même de la réponse des écosystèmes à ces pressions, engendrent des mécanismes dont les dynamiques et temps de réponse pluri-décennales à pluri-centennales restent encore largement inconnus.

Les études des paléoclimats et paléoenvironnements (P&P) permettent de pallier notre incapacité à observer directement les processus sur le temps long, en nous renseignant sur les états passés, les trajectoires, les points de bascule et les multiples interactions entre les caractéristiques climatiques et environnementales, dans des conditions variées. Elles renseignent sur les écosystèmes et la façon dont ils ont réagi aux changements environnementaux en contexte à la fois pré- et post-anthropique, offrant le moyen de mieux comprendre leurs capacités de résilience. Elles permettent également de mieux appréhender l'ampleur des changements en cours. À ce titre, elles jouent un rôle incontournable dans les rapports d'évaluation publiés par le GIEC, qui est, de plus, transposable à l'ensemble des problématiques environnementales, à commencer par la crise de perte de biodiversité et les questions traitées dans les rapports de l'IPBES.

Les travaux de recherche menés sur ces sujets en France ont permis des avancées spectaculaires pour découvrir la richesse de l'histoire du climat et de l'environnement de la Terre. Les approches et études sont extrêmement diversifiées et font appel à de multiples interactions disciplinaires et multidisciplinaires, aux échelles nationale et internationale. Les inflexions et opportunités scientifiques rapportées dans la partie « état des lieux » mettent en exergue les renouvellements constants des questionnements et le fort potentiel scientifique des P&P pour éclairer les questions environnementales attachées aux objectifs de développement durable proposés par l'ONU¹. La préparation de ce livre blanc a été l'occasion de se projeter collectivement pour identifier les grandes questions qui justifieront de nouvelles structurations et de nouveaux moyens pour les 10, 20, 25 ans à venir.

Les axes de recherche proposés posent les bases d'un programme national ambitieux s'appuyant sur les forces et orientations propres aux recherches P&P en France. Ils doivent permettre de consolider les interactions multidisciplinaires et les spécificités des activités P&P, tout en faisant ressortir les verrous et grands agendas scientifiques, qu'ils soient disciplinaires ou multidisciplinaires. Le besoin de décloisonnements thématiques et organisationnels est pris en compte dans la façon d'aborder les questions scientifiques en bénéficiant de regards complémentaires sur les différents sujets. Les priorités associées à ces enjeux scientifiques donnent des éléments pour repenser l'organisation nationale et la façon de garder et renforcer les leaderships.

1- <https://www.un.org/fr/exhibit/odd-17-objectifs-pour-transformer-notre-monde>



B

Prospective

SOMMAIRE

B1. GRANDES ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES	79
B2. QUELQUES DÉFIS SCIENTIFIQUES SPÉCIFIQUES À RELEVER	91
B3. COLLECTE ET ACCÈS AUX ARCHIVES	99
B4. DÉVELOPPEMENTS ANALYTIQUES	107
B5. MODÉLISATION, SIMULATIONS, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	111
B6. LA GESTION ET L'EXPLOITATION DES DONNÉES	119
B7. CONSOLIDER LA COMMUNAUTÉ NATIONALE P&P	123
B8. SCIENCE ET SOCIÉTÉ	127



B1. Grandes orientations scientifiques

Les différentes consultations et les inflexions en cours (cf. Etat des lieux) font ressortir trois grands axes de recherche comme trames fédératives aux recherches P&P en France. Tout en gardant comme socle les thématiques P&P, ces axes ouvrent de nouveaux points de vue sur les questions P&P et doivent permettre de bénéficier de nouvelles opportunités intégrant davantage la biologie et les questions sociétales. L'articulation des questionnements autour de ces différents axes a aussi comme objectif d'éclairer les questions actuelles autour du développement durable, en offrant des mises en perspectives des P&P plus ciblées et à même d'intégrer des processus de décision aux échelles régionales et locales. Les différentes rétroactions, qu'elles proviennent de réponses à différentes perturbations externes, ou qu'elles soient le fruit des nombreuses interactions d'échelles conduisant à des événements de grande ampleur, sont au centre des réflexions.

B 1.1 PROCESSUS COUPLÉS CLIMAT-ENVIRONNEMENT

Ce premier axe de recherche met l'accent sur le fonctionnement du système Terre. Il se focalise sur les processus et mécanismes permettant d'expliquer les grandes variations climatiques et environnementales passées en réponse à des forçages physiques externes - en particulier les variations d'énergie solaire, l'effet de la tectonique, du volcanisme, ou encore des gaz à effet de serre d'origine anthropique, l'utilisation des terres, etc. L'objectif est de combler les lacunes scientifiques concernant les interactions climat-environnement dans le système Terre. L'un des enjeux sera de fluidifier et encourager les échanges et les collaborations

dans un continuum allant de périodes très anciennes à la période instrumentale, afin de comprendre les interactions P&P à des échelles temporelles allant du million d'années à la saison.

B 1.1.1 Rôle/réponse des forçages lents et rapides

Le système climatique a connu depuis sa formation des états extrêmes, allant de l'englacement total à des conditions tropicales. De nombreux aspects des rouages à l'origine de ces grandes évolutions nous échappent encore. Il reste indispensable de mieux caractériser et comprendre comment les perturbations associées à la géodynamique interne (orogénèse, volcanisme) ou à la variabilité des ap-

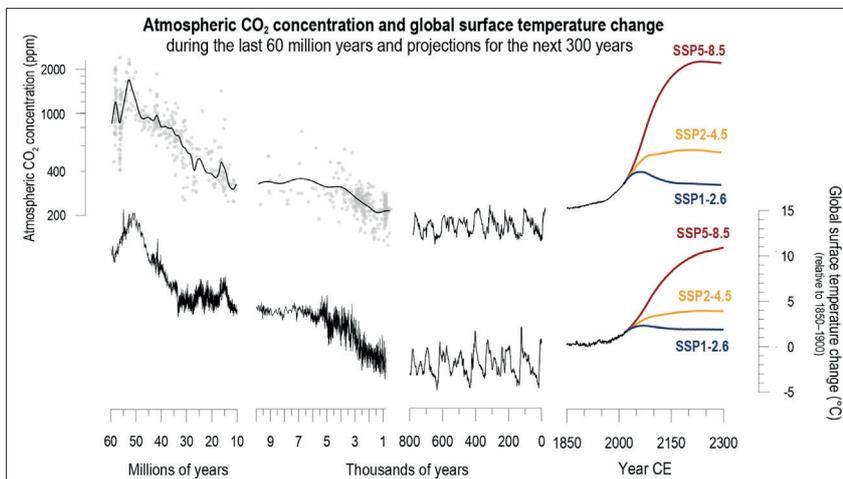


Figure B 1.1.1 – Comparaison des évolutions passées, actuelles et futures de la température globale de la planète et de la concentration atmosphérique en CO₂. Les évolutions futures illustrent différents scenarii d'émissions futures de CO₂ et la réponse climatique qui y est associée.

© Pascale Braconnot, adapté de TS AR6 2021



B 1.1.2 – Dead horse point, affleurement Permien-Trias, Utah, USA. © S. Bourquin

ports d'énergie solaire (paramètres orbitaux, irradiance solaire) affectent le bilan radiatif et modifient les sources et puits d'énergie selon des constantes de temps variées. La modulation par les rétroactions du cycle du carbone ou les variations de taille des calottes glaciaires et autres surfaces englacées (glace de mer, glaciers, permafrost), ou encore les grandes évolutions du couvert végétal, restent un sujet de recherche majeur pour comprendre les caractéristiques climatiques et environnementales et leur évolution pour différentes régions.

Les nouvelles orientations s'efforceront de quantifier les incertitudes des reconstitutions ou de combler les lacunes liées au fait que certains facteurs, comme l'irradiance solaire, restent largement indéterminés au-delà de l'Holocène. Les activités s'orientent aussi vers un approfondissement des rôles du volcanisme, des poussières et des gaz à courte durée de vie, impliqués dans les changements climatiques globaux ou régionaux sur des échelles de temps plus courtes (quelques années). Les interactions et effets non

linéaires entre les réponses à court terme (< 100 ans) et long terme (> 100 ans), dont les processus restent souvent vagues, devront être précisés pour mieux bénéficier de l'information apportée par les différentes reconstitutions, et ce, quelle que soit la période étudiée. Il devient aussi possible de caractériser la saisonnalité qui demeure actuellement une grande inconnue des reconstitutions paléoclimatiques alors qu'il s'agit d'un facteur environnemental déterminant.

Les travaux récents répertoriés dans le dernier rapport du GIEC insistent sur le fait que la sensibilité climatique, qui représente l'ampleur de la réponse de la température globale à un forçage donné, est dépendante de l'état de référence du climat et de la répartition géographique de la réponse (« effet pattern »). Cette dernière dépend de la nature des forçages ou à l'effet de rétroactions lentes provenant de l'océan, des glaces, de la végétation ou encore de l'hydrologie continentale. Les recherches P&P permettront de renseigner cet effet « pattern » en étudiant des périodes passées de transitions climatiques. Cela demande de favoriser

quelques périodes et transitoires clés pour développer un cadre cohérent bénéficiant de suffisamment de reconstitutions dans les différents milieux et de simulations telles que celles étudiées coordonnées dans le Paléoclimate Modeling Intercomparison Project pour la période récente, le quaternaire, le Pliocène ou des événements abrupts tels que le PETM.

B 1.1.2 Interactions entre les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone

Privilégier des approches intégrées « système Terre » est nécessaire pour franchir une étape dans la compréhension des interactions entre les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone qui régissent les caractéristiques de l'environnement et de ses changements tant aux échelles globales que régionales. Dans la continuité des travaux récents, un objectif critique est d'améliorer la compréhension des processus liant les caractéristiques climatiques et environnementales au sein de chaque milieu (atmosphère, océan, surfaces continentales, glaces) et entre les milieux. Une meilleure caractérisation des gradients latitudinaux et altitudinaux des grandes variables climatiques est aussi nécessaire. Les développements rendent possible l'étude approfondie, et dans un cadre cohérent, des interactions atmosphère-océan-continent ainsi que des couplages aux interfaces avec notamment l'hydrosphère continentale, la cryosphère et la biosphère.

Les analyses des différents enregistrements environnementaux, associés à des simulations faisant appel à une diversité de modèles, permettront de préciser les évolutions relatives des différents cycles, de quantifier les rétroactions globales et régionales entre ces cycles, et de déterminer leur traduction environnementale suivant la période considérée. Des interrogations demeurent sur les modifications et temps de réponse lors de transition entre deux périodes ou lors d'événements associés aux différentes échelles de la variabilité climatique. Des efforts seront consacrés à une meilleure compréhension des temps d'équilibration des réservoirs de carbone et d'eau. Ces questions sont importantes pour les simulations transitoires qui se généralisent, comme celle de la dernière déglaciation ou des cycles glaciaires-interglaciaires, qui se heurtent actuellement à des difficultés provenant de l'évolution des réservoirs de CO₂, de l'isostasie (i.e. leur altitude relative) ou encore de l'extension des calottes de glace.

Les interactions entre ces cycles aux échelles régionales constituent également des orientations de recherche qui permettront de mieux comprendre les vulnérabilités et seuils à ces échelles. Un fort intérêt a été exprimé par la communauté pour mieux caractériser ces changements environnementaux régionaux dans des zones identifiées comme étant des « hotspots » ou zones tampon (zones d'upwelling, bande sahélienne, etc.). Ces aspects régionaux seront favorisés grâce au déploiement de méthodes de des-

cente d'échelle permettant de travailler à des échelles plus compatibles entre les enregistrements et les simulations.

B 1.1.3 Spectre de la variabilité climatique et extrêmes

De nombreux progrès sont attendus sur l'analyse de la variabilité climatique et des extrêmes, quelle que soit la période climatique considérée. À l'échelle des temps géologiques, l'étude à différentes échelles de temps de séries d'âges équivalents offre le potentiel de mettre en évidence les différents ordres de cyclicités observées dans des contextes climatiques et environnementaux variés. La grande diversité de périodes particulièrement remarquables (glaciation de l'Antarctique à la limite Eocene-Oligocene, événements hyperthermaux, événements d'anoxie océanique) offre des opportunités d'étudier la variabilité climatique sous des conditions très différentes de celles du quaternaire. Le recours à une palette d'approches communes pour reconstituer les variables climatiques et environnementales entre pré-quaternaire et quaternaire ainsi que la possibilité d'atteindre des résolutions temporelles très fines dans certaines archives sédimentaires anciennes favorisera le rapprochement des communautés de « l'ancien » et du « récent » sur ces questions.

La variabilité interannuelle à millénaire fait partie des caractéristiques conditionnant l'environnement et pouvant conduire à des événements extrêmes ou des points de bascule ayant un fort impact à l'échelle d'une vie humaine. Elle bénéficie d'une attention sans cesse renouvelée grâce à l'établissement de nouvelles chronologies de plus en plus précises, l'analyse d'enregistrements sédimentaires, glaciaires ou provenant d'arbres, de spéléothèmes, de coquilles ou coraux à haute résolution temporelle et d'ensembles de simulations. Les nouvelles orientations mettront l'accent sur la diversité des événements caractérisant cette variabilité en fonction des différentes conditions environnementales. Un enjeu sera de préciser sous quelles conditions climatiques, et avec quelle sensibilité aux différents types de forçages, les phases positives ou négatives des grands modes de variabilité, comme l'oscillation nord Atlantique dans les moyennes latitudes, ou le phénomène El Niño dans les régions tropicales, affectent les conditions météorologiques régionales et conditionnent les environnements pendant de nombreuses années. Les aspects chaotiques et non linéaires de la variabilité conduisant à des événements séculaires ou millénaires recevront aussi plus d'attention. Ces échelles deviennent accessibles au-delà du dernier millénaire et de l'Holocène. Elles sont peu comprises et font partie des échelles à prendre en compte pour identifier le rôle des constantes de temps longues induites par l'océan, les surfaces continentales (couvert végétal, sols, lacs et surfaces humides) et englacées dans la prévisibilité du climat.

Les événements extrêmes reçoivent une attention croissante, car leur amplification est liée au changement clima-

B 1.1.3 – Côte d’Azur après la tempête Alex (automne 2020), montrant les panaches sédimentaires kilométriques apportés par le Var et la Roya

© photo satellite Copernicus Sentinel-2



tique comme l’a montré le récent rapport du GIEC (AR6). Nous manquons encore cruellement de reconstructions quantitatives, de la fréquence et de la sévérité des événements extrêmes dont la durée peut s’échelonner de quelques heures à quelques semaines (sécheresses, incendies, canicules, inondations, cyclones, etc.) et leurs causes. Les reconstructions existantes concernent principalement l’Holocène ou le dernier millénaire pour lequel les archives historiques permettent de compléter les archives environnementales. Ces travaux doivent être intensifiés sur cette période de temps et transposés à toutes les périodes de temps. Couvrir le spectre des possibles dans l’occurrence d’événements extrêmes à la surface de la Terre renseignera la dépendance de ces événements aux caractéristiques de l’état moyen ou des tendances à longs termes.

Enfin, les études P&P sont les seules à même d’identifier les causes et conséquences des bifurcations du système climatique ou de l’environnement. Un exemple iconique de ces bifurcations en période glaciaire est représenté par la variabilité millénaire enregistrée au Groenland sous la forme d’événements abrupts, dits « de Dansgaard-Oeschger », caractérisés par des alternances de phases climatiques chaudes et froides. Leurs durées de quelques siècles contrastent avec la rapidité de leurs transitions, typiquement d’une à quelques décennies. Ils affectent en retour les régimes de précipitations des zones de mousson aux basses latitudes. Un autre exemple, en période interglaciaire, est l’aridification du Sahara à l’Holocène moyen qui est probablement intervenue à des échelles de temps plus rapides que le forçage orbital considéré à l’origine de cette aridification. Les rouages et les éléments déclencheurs permettant de telles bifurcations sont encore mal compris et mal simulés. Ils font intervenir des rétroactions positives dans le

système climatique qui restent encore à déterminer.

B 1.1.4 Le cycle de l’eau et ses variations

Des reconstitutions combinant les informations de différents proxies commencent à se généraliser pour caractériser de nombreux aspects du cycle de l’eau, que ce soit *via* les enregistrements des glaces, des isotopes de l’eau dans différentes archives climatiques, les données de polliniques, les niveaux passés des lacs ou les glissements de terrain liés à des précipitations intenses. Ces reconstitutions alliées aux simulations climatiques nous renseignent sur les modifications des positions des grands systèmes précipitants liés à la zone de convergence intertropicale, aux passages dépressionnaires des moyennes latitudes, ou aux systèmes de mousson. Cet effort sera intensifié. Des progrès sont attendus des comparaisons modèles-données des isotopes de l’eau, qui sont encore trop peu développées et exploitées. Ces comparaisons permettront d’évaluer la représentation des processus atmosphériques des modèles et d’affiner l’interprétation des signaux isotopiques issus des différentes archives, et ainsi de mieux comprendre la distribution des types de précipitation dans un climat donné.

Les modifications du cycle de l’eau sont aussi associées à des changements de couvert neigeux, la fonte ou la construction des calottes ou des glaciers, le niveau marin et le rôle de la végétation dans le recyclage local. Ses modifications et les variations environnementales affectent la mise en place des ressources en eau, que ce soit les réservoirs profonds, les fleuves, les rivières ou les lacs qui conditionnent les écosystèmes et l’implantation des sociétés. À titre d’exemple, les mécanismes impliqués dans l’apparition, puis la disparition du « Sahara vert » et la dynamique des méga-lacs associés

(Tchad, Abbé, etc.) font partie des incertitudes majeures du fonctionnement de la mousson africaine. Ils font intervenir des dynamiques de création, extension, déclin, voire disparition, des grandes masses d'eau intracontinentales, de zones humides ou de couvert végétation qui jouent un rôle de source secondaire d'humidité locale et sont encore mal représentées dans les modèles actuels.

Mieux prendre en compte ses effets croisés climat-environnement permettra de plus une focalisation sur les sécheresses ou les périodes particulièrement humides. Les recherches porteront sur les facteurs déclencheurs de ces événements et la réponse de l'environnement (rétroactions en cascades, seuils d'irréversibilité, etc.) que ce soit sur le cycle de l'eau lui-même ou sur les caractéristiques de la végétation. De même, l'étude détaillée du développement à certaines périodes géologiques d'importantes successions évaporitiques (e.g. séries triasiques ou permienes, crises messiniennes) bien calées temporellement (sur de courtes périodes de temps) et dans différents contextes climatiques et géodynamiques permettra de comprendre des rétroactions positives débridées dont l'occurrence dans le monde actuel aurait des répercussions considérables.

Pour le milieu marin, le cycle de l'eau conditionne la salinité et les transports de sel par la circulation océanique. Il fait intervenir l'évolution des calottes, de la glace de mer, des glaciers, des rivières et embouchures, ensemble de milieux pour lesquels les analyses morphologiques ou géochimiques permettent de préciser le fonctionnement et les principaux facteurs de variation. La reconstitution quantitative des paramètres caractérisant les masses d'eaux permettra d'étudier des événements hydrologiques ayant profondément affecté les environnements marins. Les méthodes donnant accès à la salinité se sont diversifiées, notamment *via* l'émergence de nouveaux outils en géochimie



B 1.1.4 – Plate-forme de carottage du lac Barombi Mbo, Cameroun.

© Y. Garcin»

(isotopes des biomarqueurs phytoplanctoniques, rapports Na/Ca et Ba/Ca des foraminifères, etc.). Il en est de même pour la reconstitution des couverts de glace de mer. Ces innovations sont encore largement sous-exploitées dans le cadre d'approches multi-proxies et multi-sites : leur croisement avec des méthodes historiquement bien établies (e.g. fonctions de transfert sur les assemblages de microfossiles) sur un spectre géographique contrasté doit être mis en œuvre pour renforcer la robustesse des reconstitutions tout en révélant les lacunes ou biais potentiels propres à chaque méthode développée.

B 1.2 FORÇAGES BIOTIQUES ET ABIOTIQUES ET SEUILS SUR L'ÉVOLUTION DES ÉCOSYSTÈMES

Le deuxième grand axe de recherche s'intéresse aux interactions entre le vivant et le non-vivant à la surface de la Terre. Les approches P&P permettent d'étudier comment ces interactions façonnent l'environnement et les écosystèmes. Étudier les cas du passé dans l'histoire de l'environnement terrestre revient à lire les résultats d'immenses expériences *in natura* qui nous éclairent sur les processus fondamentaux mis en œuvre dans les changements globaux actuels. Ils permettent de comprendre le fonctionnement naturel des écosystèmes, d'identifier les vulnérabilités, seuils et mécanismes de résilience, et, ainsi, de mieux évaluer les modifications induites à l'heure actuelle par les activités anthropiques.

B 1.2.1 Cycles du carbone et des nutriments et interactions vivant-climat-géodynamique

Le volet de recherche sur le cycle du carbone et des nutriments s'intensifiera dans les prochaines années en intégrant les interactions vivant-climat-géodynamique. Les teneurs en CO₂ atmosphérique à long terme dépendent étroitement du cycle des carbonates, avec des composantes continentales et océaniques encore mal comprises, ce qui affecte l'interprétation des enregistrements passés et la compréhension des changements induits par l'activité humaine et de leur impact sur les différentes échelles de temps du cycle du carbone. À la surface des continents, l'oxydation des roches riches en pyrite peut entraîner la formation d'acide sulfurique et la dissolution des roches carbonatées, et donc le dégazage de CO₂ vers l'atmosphère, en faisant interagir la géodynamique et les cycles du soufre et du carbone à ces échelles. L'altération continentale amène à l'océan les éléments nécessaires à la synthèse des carbonates (calcium, nutriment, carbonates) et évolue ainsi dans le temps et en fonction du climat. Les nouvelles études permettront de mieux caractériser ces différents facteurs.

De même, la façon dont les cycles du carbone organique marin et du CaCO₃ interagissent n'est pas bien comprise. Un enjeu important sera de caractériser l'influence de l'acidification et du réchauffement des océans sur la biominé-

ralisation, d'affiner la compréhension des relations entre export de matière organique et de carbonates et, enfin, de comprendre les processus biogéochimiques qui régissent la dissolution du CaCO_3 dans l'océan, de l'échelle microscopique à l'échelle mondiale. L'objectif est de quantifier l'importance de cette dissolution en tant que mécanisme de rétroaction contrôlant les niveaux de CO_2 dans l'atmosphère.

Les cycles du carbone et des nutriments conditionnent le maintien des paysages et de la biodiversité. Cependant, la géochimie élémentaire et/ou isotopique ne permet pas de reconstituer toute la complexité des processus biogéochimiques dans lesquels les éléments nutritifs interviennent. Un objectif fondamental sera de distinguer flux nets (par exemple enfouissement de carbone organique) et flux bruts (par exemple productivité primaire) en ce qui concerne les productions organiques, siliceuses ou carbonatées, ou encore la formation de pyrite. Une telle distinction est nécessaire pour estimer les temps de résidence des éléments dans les réservoirs géochimiques, et pour comprendre l'ensemble des processus « en amont » de l'archive sédimentaire (approche « source-to-sink »). Une piste proposée est l'étude de systèmes continentaux fermés, tels que les bassins endoréiques ou lacustres. D'autres points critiques à étudier émergent également tels que le rôle de la subduction sur les cycles biogéochimiques et les effets, peu contraints, de la diagenèse sur ces cycles, dont les flux associés sont parfois mal connus (e.g. formation d'argiles et de carbonates authigènes, production/consommation d'alcalinité, réduction microbienne des sulfates). Enfin, les stocks, flux et biodisponibilités des nutriments dans l'environnement (ex. N, P, etc. vers milieux aquatiques, fleuves) seront précisés. L'étude d'archives collectées dans les estuaires devrait devenir plus systématique pour mieux caractériser ces zones d'interface sensibles entre continent et océan en traçant les flux de matière solide et dissoute pour différents régimes climatiques et environnementaux. Ces nouvelles avancées sont envisageables grâce aux développements des analyses sur des composés de plus en plus variés.

Pour mieux comprendre l'évolution des flux de nutriments et de CO_2 , le fort couplage avec le cycle de l'oxygène lors des processus biologiques est un atout. Nutriments et CO_2 sont consommés par la photosynthèse, et l'inverse se produit lors de la respiration pour l' O_2 . Les cycles de la matière organique et des nutriments essentiels tels que N, P ou S ainsi que leur enfouissement sont fortement modifiés par de faibles teneurs en oxygène (dénitrification/annamox/fixation d'azote, remobilisation sédimentaire de P, sulfato-réduction). Les changements survenant dans les cycles des nutriments, du carbone et de l'oxygène peuvent être identifiés par les variations des compositions isotopiques de ces éléments. Un enjeu important pour le futur est donc de développer la mesure et l'incorporation, dans les modèles, du CO_2 , de l' O_2 , des nutriments et de leurs isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 , $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de l' O_2 , $\delta^{15}\text{N}$ de l'azote) dans les compartiments océaniques et atmosphériques ainsi que la

résolution des boucles microbiennes fonctionnant dans les systèmes anoxiques.

Beaucoup reste à faire concernant le cycle de l'oxygène et des nutriments et le couplage entre ces cycles. Les événements extrêmes que constituent les perturbations d'anoxie majeure du passé (sapropels, anoxies grande-échelle du Crétacé et du Jurassique) s'avèrent des cas idéaux pour confronter notre compréhension de ces cycles aux archives sédimentaires. Il apparaît également nécessaire de s'intéresser aux respirations non oxiques (par exemple la réduction microbienne des nitrates, des sulfates), qui jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone et de l'oxygène, mais dans des zones parfois difficiles d'accès comme les fonds océaniques. Ces flux contribuent à réguler les teneurs en CO_2 (et O_2) de l'atmosphère.

Sur les continents, les sols constituent l'interface fondamentale entre la lithosphère, l'atmosphère et la biosphère. Ils sont le compartiment central de la zone critique et le support indispensable de tous les éco- et socio-écosystèmes continentaux. Plusieurs études récentes ont montré qu'ils évoluaient selon des cinétiques plus rapides qu'imaginé auparavant et qui dépassent le seul Holocène, ouvrant un certain nombre de nouveaux chantiers. Ces nouvelles directions permettront de répondre aux questions actuelles sur les solutions de stockage de CO_2 dans les sols et les écosystèmes ou le stockage/relargage de contaminants. Elles s'attacheront à quantifier (I) les interactions climat/lithosphère/sociétés, (II) la dégradation actuelle des sols, (III) les sources et puits de carbone associés à l'évolution des sols, et (IV) les flux de nutriments et contaminants.

B 1.2.2 Biodiversité, trajectoires des écosystèmes et interactions avec le climat et l'environnement

La caractérisation des patrons de biodiversité et la compréhension de leurs évolutions au cours des temps géologiques nécessitent d'identifier les facteurs de pression environnementale qui contraignent la stabilité et la vulnérabilité des écosystèmes en intégrant des temps longs. Un enjeu des approches P&P sera aussi de se mobiliser davantage pour résoudre les défis associés à l'érosion actuelle de la biodiversité. Il s'agira de tirer parti perspectives temporelles inaccessibles à l'observation directe et qui permettent de caractériser et comprendre le rôle des s'intéressant aux facteurs environnementaux et des cinétiques contraignant les trajectoires à différentes échelles de temps.

Les pools taxonomiques modernes sont l'héritage de l'historique de renouvellement des populations et des organismes à la faveur d'événements brutaux ou de déséquilibre des biomes et biotopes, et des phases de stabilité où les niches écologiques sculptent la plasticité génétique du vivant. Aux échelles de temps géologiques, les enveloppes fluides se redistribuent au gré des modifications de la terre solide, ce qui contrôle les modifications climatiques



B 1.2.2 – Forêt de conifères après le passage d’un incendie dans la région du Grand Canyon. © A.-L. Daniau »

et environnementales majeures. En créant des barrières géographiques et climatiques isolant les populations, ces processus contribuent à l'évolution des espèces et à leur distribution géographique. Les études d'évolution des écosystèmes à différentes échelles de temps bénéficieront de la capacité à intégrer à la fois l'impact des facteurs environnementaux tels que les régimes de perturbation, les modifications géologiques et climatiques sur la diversité biologique et la dissémination des paléo-faunes et flores. L'identification des facteurs de vulnérabilité des écosystèmes passés et actuels, ainsi que des rétroactions des écosystèmes sur les caractéristiques environnementales feront également partie des points d'attention majeure. Enfin, la prise en compte de l'évolution des groupes taxonomiques permettra de mieux caractériser les patrons de biodiversité et leurs évolutions temporelles pour des conditions climatiques et environnementales contrastées.

Ces études bénéficieront de l'émergence spectaculaire de l'ADN sédimentaire qui permet d'étudier plus en détail l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique génétique, de mieux comprendre les capacités de résilience des communautés, d'intégrer la complexité biologique dans l'évolution des écosystèmes et d'appréhender plus finement la dynamique des peuplements et la dissémination des paléo-faunes et flores. L'importance de l'intégration de la complexité biologique dans l'évolution des écosystèmes, ainsi que l'analyse des dynamiques écologiques et de la récupération écosystémique sera critique pour reconstruire les trajectoires écosystémiques. Une question émergente porte sur le rôle que l'épigénétique pourrait jouer dans la coévolution des biomes et biotopes.

Les nouvelles directions permettront aussi d'affiner le rôle

des feux sur les écosystèmes et le lien cycle du carbone-feux. Les incendies naturels peuvent être perçus comme des événements catastrophiques, mais ils sont également facteur d'évolution ou d'équilibre dans le fonctionnement des écosystèmes (e.g. maintien de la savane). Plusieurs proxies peuvent être quantifiés pour reconstruire les changements d'activités des feux dans le passé et comprendre les liens entre les feux, le climat et l'environnement. Ils proviennent de la morphologie des charbons permettant de caractériser des types de végétation brûlées et l'intensité des incendies à travers de multiples traceurs. Les produits de combustion sont aussi détectés au niveau moléculaire par le Black Carbon ou par des marqueurs biogéochimiques (levoglucosane, HAPC, etc.). La calibration de ces différents proxies permettra de mieux connaître les processus à prendre en compte dans la modélisation des feux.

Il est proposé de questionner la fragilité/résilience des écosystèmes à différentes échelles de temps et d'espace en travaillant sur la notion « d'insularité » déclinée pour différents types d'environnement (îles de petite surface, zones d'endémisme marines ou continentales, continents isolés, avec ou sans influence humaine). En parallèle, on pourra intensifier les approches expérimentales pour étudier les conséquences du remplacement ou de la suppression d'espèces dans la résilience de communautés face à des facteurs perturbateurs contrôlés. Des progrès sont aussi attendus du développement de la modélisation de communautés ou d'écosystèmes, tout en mobilisant ou développant les suivis à long et moyen terme en s'appuyant par exemple sur les Zones ateliers (ZA) ou les Services nationaux d'observation (SNO). Les nouvelles approches devraient permettre de mieux caractériser les dynamiques écologiques, par exemple dans le cas de la récupération écosystémique suite

aux exploitations humaines par l'analyse croisée de la résilience d'écosystèmes récents et sub-récents.

B 1.2.3 Crises environnementales

Les crises environnementales sont de différentes natures et sont associées à des facteurs climatiques ou à des seuils ou modifications profondes des écosystèmes. Les travaux à venir ont comme objectifs de mieux définir les conditions dans lesquelles interviennent ces crises. L'analyse de différentes crises dans le passé permettra d'affiner ce lien entre les crises et l'état de base pré-perturbation du système climat-biosphère. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure les conditions environnementales préexistantes à la crise contrôlent la réponse du système à une perturbation. Plusieurs directions seront privilégiées concernant les seuils à franchir pour que le système bascule dans un état de crise. Elles chercheront à caractériser les rétroactions environnementales amplificatrices et les possibles liens avec les conditions extrêmes et points de bascule suivant les écosystèmes et régions étudiées (section B 1.3.). Une question particulière concerne les réponses majeures à des perturbations de faible ampleur durant les périodes de quiescence, ainsi que l'identification des rétroactions stabilisatrices.

L'étude des périodes transitoires, entre deux états de base et/ou lors d'une entrée ou d'une sortie de crise, reste encore difficile alors que ces périodes sont cruciales pour comprendre l'enchaînement des événements aboutissant, ou non, à un basculement du système dans un état de crise. L'association de modélisations simplifiées (climatiques, géochimiques, et intégrant la biosphère), et de jeux de données permettant de caractériser des événements extrêmes globaux, de courte durée, à l'échelle des temps géologique (e.g. Carnian Pluvial Event ou grandes éruptions volcaniques, environ 1 Ma) à différentes latitudes est la voie privilégiée pour quantifier les temps de réponse et s'interroger sur les hypothèses de modélisation.

B 1.3 LIEN HUMAIN/CLIMAT/SOCIO-ÉCOSYSTÈMES

Le troisième axe aborde la complexité des interactions entre sociétés humaines et le système Terre. Il aborde différentes facettes ayant une résonance avec les questions actuelles d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et de lutte contre la dégradation de l'habitabilité de la Terre en général. Il a pour ambition à la fois de mieux caractériser la résilience des sociétés aux diverses pressions climatiques et environnementales, et de mettre en contexte les multiples effets des activités humaines, ces dernières conduisant à de grandes modifications du climat, de l'environnement et aux risques de franchir des seuils irréversibles pour nos sociétés. Ces études favorisent les approches systémiques, et répondre à ces questions nécessitera une ouverture interdisciplinaire bien plus large que celle qui prévaut actuellement dans les thématiques P&P.

B 1.3.1 Trajectoires des sociétés dans leur environnement

Les trajectoires passées des sociétés humaines sont influencées, entre autres, par les conditions environnementales. Les travaux s'appuient souvent sur des liens statistiques, des corrélations temporelles qui relient des événements synchrones sans prendre en considération des temps de latence et les effets cumulatifs ou de seuil, ou sans rechercher les liens de causalité. Or, les sociétés peuvent être résilientes face à l'évolution des conditions environnementales, au moins dans une gamme de variabilité connue et maîtrisée par les populations, jusqu'à ce que ces évolutions dépassent leurs capacités d'adaptation. De même, dans des conditions environnementales stables, des changements d'ordre socio-économique, démographique, technique ou politique peuvent altérer la capacité d'adaptation des sociétés, par exemple par une surexploitation des ressources. Pour ces raisons, l'un des enjeux sera de faire coïncider les chronologies environnementales (archives et sorties de modèles) avec les chronologies sociales et culturelles pour comprendre les mécanismes d'interaction.

Les recherches à venir doivent ensuite permettre de mieux comprendre la dynamique propre des sociétés anciennes, leurs mutations et leurs rapports aux changements environnementaux. Les questions portent sur le degré de résilience des sociétés du passé et les modalités d'adaptation de ces sociétés, en prenant en compte les changements d'organisation politique et économique, les réponses technologiques, les déplacements de populations et migrations. La transformation de la société est un autre aspect important pour déterminer les conditions ayant conduit à des effondrements ou des ruptures.

Le dialogue avec les sciences sociales reste novateur et devra se développer afin de mieux comprendre le lien intime entre l'évolution des sociétés et celle de l'environnement qui constitue leur cadre de vie. L'impact des changements environnementaux sur la mobilité, la structuration sociale et les inégalités sociales ou de genre (contrôle des naissances, accès aux ressources, etc.) ou sur l'histoire des technologies et des conflits mérite d'être mieux documenté. Par exemple, la mobilité n'est pas forcément réalisée sous contrainte (nomadisme, pastoralisme, pendularité) et le statut nomade/sédentaire n'est pas systématiquement lié à l'incertitude environnementale.

B 1.3.2 Impacts des sociétés sur les écosystèmes

À l'ère de l'Anthropocène, tous les paysages sont, de façon plus ou moins marquée, des constructions humaines, liées à des pratiques, associées à la gestion des ressources. L'impact des sociétés sur les écosystèmes augmente depuis les débuts de l'Humanité, avec des périodes d'accélération, comme au Néolithique ou avec la Révolution industrielle, qui constituent autant de points de non-retour ayant dé-

bouché sur de nouveaux équilibres écologiques. Dans ce contexte, un enjeu est de mieux définir l'Anthropocène, dans son acceptation la plus large, notamment pour comprendre comment et pourquoi les milieux actuels sont hérités des pratiques et de modes de gestion passés des territoires. Les travaux privilégieront des démarches considérant des échelles spatio-temporelles multiples, embrassant à la fois des événements ponctuels ou progressifs, rapidement réversibles ou irréversibles aux échelles de temps humaines. À partir du Néolithique, il s'agit d'appréhender la mosaïque environnementale qui constitue le territoire, composée par la succession d'espaces domestiqués, aménagés ou artificialisés à des degrés divers, de zones exploitées plus ou moins intensément et de zones à l'anthropisation plus diffuse.

La question de l'anthropisation des milieux devra être abordée à l'échelle des écosystèmes, des espèces, des populations et des individus. Cela implique l'implication de disciplines allant de la géographie physique à la biologie autour de questions communes. Il s'agira en premier lieu de décrire et de quantifier les processus par lesquels les sociétés modifient les empreintes environnementales (sols, rivières, lacs) à toutes les échelles et dans des contextes climatiques

B 1.3.2 – Prélèvement ADN Néolithique - Fouille de Pertus, Alpes de Haute Provence, France. © C. Lepere»



variés. En particulier, l'impact de la prédation et de l'usage des terres (sol, eau, agriculture, élevage, usage du feu, etc.), les pratiques, dynamiques et diversités agro-sylvo-pastorales, ainsi que les trajectoires qui ont conduit aux anthroposols (des sol fortement modifiés ou fabriqué par l'homme et considérés comme des archives de l'histoire de l'Humanité) sont des sujets d'étude amenés à se développer.

Une attention particulière doit être portée aux aménagements tels que les réseaux viaires, les terrasses de culture, l'usage du sous-sol (carrières, mines, etc.), les systèmes de drainage ou d'irrigation et la manière avec laquelle ils ont affecté la connectivité des écosystèmes et du réseau hydrologique, la topographie et la morphologie des paysages, ainsi que les transferts de matière. Il en est de même avec l'étude des aménagements liés à l'usage des milieux humides et aquatiques continentaux (lacs, littoral, fleuves et rivières, milieux insulaires, etc.) et marins (ports, gestion de crues, de l'érosion littorale, etc.). En effet, ces derniers ont un impact sur les ressources aquatiques (pêcheries, eutrophisation, etc.) mais aussi sur le compartiment atmosphérique (émissions de GES liées à l'usage des terres, contamination au plomb, effet Sues, etc.).

Les activités humaines ont laissé leur empreinte sur les milieux, mais aussi un héritage lourd sur le vivant par l'introduction (invasions anthropogènes) ou l'éradication/extinction d'espèces, par la domestication (changements morphologiques, éthologiques, diversité génétique...) ou la favorisation d'espèces anthropophiles. L'étude de ces trajectoires et héritages doit être envisagée dans une vision pleinement écologique, de l'individu au paysage. Par exemple, il faudra dépasser les inventaires floristiques et s'attacher à documenter la physionomie des végétations passées.

L'impact des activités humaines, souvent considéré de manière négative, a également permis le développement de nouveaux écosystèmes, de milieux singuliers qui constituent parfois des îlots de biodiversité, au point qu'une part majeure de la biosphère est aujourd'hui occupée par des anthromes (biomes anthropiques). Enfin, les paysages et écosystèmes actuels résultent parfois d'événements politiques ou économiques brutaux (guerres, réorientations économiques, colonisation...). Une meilleure prise en compte de ces événements dans la construction des paysages (exemple des « bombturbations »), dans leurs trajectoires, est nécessaire pour satisfaire l'ambition d'une vision pleine et entière de l'Anthropocène. Toutes ces questions nécessiteront un dialogue renforcé entre la biologie, l'écologie, l'histoire et la paléobiogéographie.

B 1.3.3 Évolution du lien sociétés-ressources

La disponibilité des ressources nécessaires à la subsistance et à l'ensemble des réalisations techniques humaines est soumise aux changements globaux, qui peuvent en limiter

le volume ou l'accès, ainsi qu'à la pression que les sociétés font peser sur elles. A la base de l'économie de subsistance, se trouvent les ressources alimentaires mais aussi les ressources permettant la production ou l'exploitation de ces dernières. Toutefois l'exploitation du milieu naturel ne se limite pas à ces besoins vitaux (fabrication d'objets et produits divers, constructions et infrastructures, transports, loisirs, production d'énergie). La disponibilité des ressources renouvelables dépend de l'intensité de leur exploitation et de leur capacité de régénération ; les ressources épuisables sont, elles, définitivement inutilisables après usage, alors que le stock accessible des ressources recyclables dépend des capacités techniques et de la volonté de recyclage.

La complexité des systèmes de gestion des ressources et leurs impacts sur le milieu comme sur l'organisation sociale des groupes humains sont déjà des sujets de recherche dont s'emparent les spécialistes des économies de prédation (subsistance basée sur la chasse et la collecte) et des contextes peu transformés (Pléistocène, Holocène ancien) comme ceux qui s'intéressent aux économies de production (subsistance basée sur l'agriculture et l'élevage) jusqu'à celles dominées par le secteur tertiaire et aux contextes anthropisés, voire artificialisés (Holocène moyen et récent, Anthropocène). L'impact des pénuries, les stratégies d'adaptation, les conflits ou les alliances engendrés par les besoins d'accès aux ressources sont par ailleurs documentés par les sciences historiques. Pour comprendre les trajectoires sur le long terme, il est donc nécessaire d'estimer pour différentes périodes les paléo-baselines, les paléostocks et systèmes morphogéniques sur lesquels a pesé l'exploitation passée. Pour cela, il faut croiser les informations issues de la connaissance des gisements (géologie) ou des paléo-écosystèmes (paléoenvironnement) et celles qui permettent de documenter l'ampleur de la consommation à une période et sur un territoire donné (archéologie, données historiques).

Des innovations analytiques en archéozoologie, archéobotanique, bioanthropologie, bio- et géochimie permettront d'approcher de plus en plus finement les stratégies de subsistance (saisonnalité des pratiques, mobilité des groupes humains, conservation et stockage des ressources), faisant apparaître le recours à une large gamme de modes d'exploitation et de gestion des ressources. Les avancées rapides obtenues notamment dans les domaines de la biologie moléculaire, de la chimie isotopique, des omiques, de l'histologie animale et végétale viennent en appui d'une expertise naturaliste dont on doit encourager la persistance et la transmission, dans un écosystème de la recherche frénétique et compétitif peu favorable aux approches traditionnelles et de longue haleine. La connaissance des modes de vies des sociétés du passé, très anciens comme très récents, apporte également un éclairage sur les questions d'alimentation *sensu lato* (adaptation, transition, variabilité) et de transition alimentaire, du rapport entre (sur)exploitation des ressources naturelles et avancées technologiques et

enfin du lien entre ressources et territoire. En considérant les écosystèmes comme pourvoyeurs à la fois de ressources et de services hérités des paléoclimats et paléoenvironnements, les thématiques P&P s'ouvrent aux sciences de la durabilité ainsi qu'aux sciences juridiques (droit de l'environnement et de la nature, question du statut des cours d'eau, des êtres vivants non-humains), aux sciences du risque et aux sciences sociales.

B 1.3.4 Aléas et risques

La question du risque peut s'aborder sous l'angle de l'aléa (plus ou moins impactant et/ou probable) et sous celui de la vulnérabilité des sociétés (plus ou moins sensibles à un aléa donné). Les sciences sociales éclairent ces deux aspects, mettant en avant le caractère souvent politique des conséquences des catastrophes naturelles sur les sociétés. Les événements abrupts ou extrêmes, mais aussi le franchissement de seuils lors de transformations progressives, peuvent avoir des conséquences catastrophiques et imprévues, largement conditionnées par les héritages géologiques, écologiques ou humains. Si les conséquences de ces événements sont souvent considérées comme néfastes, ils peuvent parfois offrir de nouvelles opportunités. Les réponses des sociétés, comme la mise en œuvre de stratégies de résilience et/ou de restauration de leur environnement, impliquent la compréhension des déclencheurs de ces phénomènes mais dépendent aussi de la capacité collective à accepter (ou non) des phénomènes aléatoires.

Une interrogation porte sur l'échelle spatiale à laquelle les impacts se font sentir sur les populations humaines et sur les écosystèmes selon leur nature. Il s'agit par exemple d'événements singuliers et/ou multi facteurs d'origine climatique, volcanique, sismique, anthropique, ou géomorphologique, engendrant des épisodes de sécheresses, crues, inondations, tempêtes, mégafeux, glissements de terrains, pollutions, etc. Pour les zones côtières, les ouragans et les tsunamis sont parmi les événements extrêmes les plus destructeurs et imprévisibles, dont les effets peuvent être d'autant plus prégnants qu'ils affectent des zones hébergeant des stocks naturels ou anthropiques de substances potentiellement polluantes (hydrocarbures, radionucléides, etc.). Ils modifient radicalement le paysage, mais sur des fenêtres temporelles si courtes qu'elles ne sont pas toujours visibles dans les archives analysées.

Un autre exemple concerne les risques sanitaires liés aux conditions environnementales qui reviennent sur le devant de la scène dans un contexte de forte inquiétude environnementale attisée par l'ampleur de récentes épidémies infectieuses (covid) ou liées à la pollution (particules, produits phytosanitaires, etc.). L'approche « *One Health* », qui considère l'interdépendance sanitaire entre les humains et les différentes composantes de leur environnement, à toutes les échelles, prend de l'ampleur depuis quelques dizaines d'années. Elle pourrait s'enrichir d'un regard vers le passé,

par la collaboration entre d'une part les spécialistes en paléopathologie (englobant l'ensemble des études humains/non humains/pathogènes) d'autre part les spécialistes en des autres organismes vivants à leur contact (archéobotanique, archéozoologie), et enfin les spécialistes des pathogènes (paléomicrobiologie, paléoparasitologie) et des polluants (géochimie).

B 1.3.5 Gestion et conservation/protection du patrimoine naturel et culturel

À l'Anthropocène, il n'est plus possible de considérer le patrimoine naturel en faisant abstraction des pratiques humaines qui ont présidé à sa conservation, son avènement, sa modification ou sa dégradation. La conservation des paysages dit « naturels » suppose la préservation ou la restauration des pratiques associées. La connaissance de ces pratiques, associée à des inventaires de la diversité génétique (espèces cultivées/élevées, variétés anciennes, traditionnelles, locales), peut offrir des alternatives « low-tech », plus durables et plus robustes face aux risques (gel, sécheresse, tempêtes, ravageurs, maladies), aux pratiques intensives et aux variétés commerciales et races améliorées (restauration des sols et de l'(agro)biodiversité).

Si les populations humaines accordent une valeur importante et patrimoniale aux espaces jugés naturels, elles ignorent souvent le rôle joué par leurs prédécesseurs dans leur construction. Les études paléoenvironnementales renseignent sur ces aspects et sont à même de mettre en lumière la trajectoire des paysages au-delà de la mémoire collective, proposant ainsi différents scénarios de conservation ou de restauration des milieux.

Il est important de s'emparer également de la préservation des patrimoines géologiques dont l'existence et l'accessibilité résultent d'une histoire paléoenvironnementale longue à laquelle se surimpose, sur un temps plus court, la relation avec les sociétés humaines (mise en réserve, exploitation, destruction, conflit). Quant au patrimoine culturel, si les mêmes questionnements s'imposent, les P&P peuvent apporter une expertise complémentaire à celle des communautés SHS et des instances gestionnaires qui sont les premières concernées.



B2. Quelques défis scientifiques spécifiques à relever

Les enjeux scientifiques identifiés dans les 3 principaux axes autour desquels s'accroîtront les recherches P&P en France dans les prochaines années s'accompagnent de nombreux verrous et défis à relever. Plusieurs aspects méritent d'être soulignés. Ils se situent à la jonction entre verrous scientifiques et méthodologiques et vont fortement mobiliser les compétences interdisciplinaires. Les éléments proposés ci-dessous représentent quelques axes majeurs sur lesquelles les compétences réunies en France permettent d'entrevoir des avancées majeures (liste non exhaustive) dans les prochaines années.



B 2.1.2 – Spectromètre de masse par accélérateur ASTER, sur le site du CEREGE © Thibaut VERGOZ / CEREGE / CNRS Images

B 2.1 ÉLABORATION ET AMÉLIORATION DES CHRONOMÈTRES

B 2.1.1 Enjeux et verrous

La géochronologie doit relever plusieurs défis pour repousser les limites actuelles des reconstitutions des climats du passé. Ce sont des enjeux scientifiques et méthodologiques forts, à la croisée de différentes compétences pour lesquels de nombreuses innovations scientifiques peuvent émerger au niveau national.

Il est fondamental de construire les modèles d'âge pour chaque archive, afin d'ancrer correctement les signaux mesurés sur l'axe des temps. Ces modèles reposent la plupart du temps sur des méthodes de datations absolues à partir d'échantillons discrets (e.g. 14C, U-Th, K-Ar, luminescence). Or, la construction de ces modèles doit s'appuyer sur des hypothèses, a priori sur l'évolution du taux de sédimentation (ou d'accumulation) entre deux points de datation absolue. Ces hypothèses sont parfois difficiles à vérifier, a fortiori, lorsqu'il n'existe pas d'observables stratigraphiques pour synchroniser l'archive considérée. Aussi, il faudra acquérir les techniques pour reconstruire en routine les taux de sédimentation/accumulation entre deux points de datations absolues, mais aussi des marqueurs géo/bio-stratigraphiques ubiquistes qui permettent de synchroniser différentes archives entre elles.

À l'autre bout du spectre chronologique, un enjeu particulier concerne la datation juste et précise des archives paléoenvironnementales très récentes (inférieures au siècle), qui sont capitales pour faire le lien avec les problématiques environnementales actuelles (érosion de la biodiversité, dispersion de polluants et/ou d'espèces invasives, réponse des écosystèmes au changement climatique en cours, etc.).

B 2.1.2 Développements analytiques et méthodologiques prioritaires

Les développements prioritaires concernent le niveau méthodologique et instrumental (section B 4) et le domaine de la construction des modèles d'âge. Les défis pour améliorer les chronomètres utilisés en paléoclimatologie (e.g. nucléides cosmogéniques, datation par luminescence, U/Th ou 14C pour les archives sédimentaires et teneur en air et composition élémentaire et isotopique de N₂, O₂, Ar pour la glace) sont, pour les chronomètres existants de :

- 1- diminuer la taille requise des échantillons ou permettre la mesure de plusieurs traceurs sur un même échantillon ;
- 2- améliorer la précision et la justesse des datations ;
- 3- développer de nouveaux chronomètres, notamment pour les fenêtres temporelles aveugles (e.g. 81Kr, 36Cl/26Al/10Be pour la glace, 41Ca pour les roches, ADN, etc.).

Ces développements reposent sur le développement per-

manent des méthodes analytiques et le renforcement des capacités instrumentales actuelles (maintien et extension du parc instrumental actuel intégrant de nouvelles techniques), que le réseau RÉGEF et la pérennité des services nationaux permettent de coordonner et de partager, en parallèle des financements sur projet, qu'ils soient nationaux ou internationaux. Il s'agit aussi d'optimiser les techniques de préparation des échantillons pour permettre d'avoir accès à un plus grand nombre de chronomètres sur différentes matrices.

La cyclostratigraphie est une approche pluridisciplinaire particulièrement adaptée aux longues échelles de temps, qui identifie et exploite (par des approches numériques) des cycles dans les archives sédimentaires. Ces techniques sont en plein essor, et doivent être consolidées en développant la mesure et la compréhension de l'origine des signaux à toutes échelles de temps (saisonniers, pluriannuels, orbitaux) tout en améliorant les traitements mathématiques de ces signaux. Il est ainsi devenu possible de proposer des reconstitutions des variations de phénomènes climatiques interannuels comme l'ENSO dans des climats anciens comme le Cénozoïque.

L'intercomparaison des différents chronomètres analysés dans la même archive est une des clefs pour améliorer la justesse des datations, en prenant en compte de manière ubiquiste toutes les observations chronologiques (âges absolus, relations stratigraphiques relatives et estimation des flux de sédimentation, prises en compte des *lag time* et des temps de résidences). Dans cette démarche, les outils de modélisation numérique développant des approches statistiques bayésiennes, comme celles développées pour le modèle PaleoChrono (cf. section B 5.1.2), sont très prometteuses et permettront des progrès majeurs.

B 2.2 DÉVELOPPEMENT DE TRACEURS ET DE PROXIES

B 2.2.1 Compréhension des processus de construction, d'enregistrement et de préservation du signal

Sédiments carbonatés, téphras et turbidites, canal du Mozambique



Sédiments laminés riches en diatomées, zone anoxique péruvienne



B.2.2.1 © Guillaume Leduc.

Un proxy paléoclimatique et/ou paléoenvironnemental est une métrique indirecte qui fait l'approximation d'un paramètre physico-chimique défini par une unité. Un traceur ou marqueur est un paramètre lui aussi mesuré dans les archives paléoenvironnementales qui témoigne d'un processus ou de la présence d'un organisme ou d'un élément, sans pouvoir être relié quantitativement à une variable environnementale définie par une unité.

La meilleure compréhension des signaux P&P nécessitera en premier lieu d'augmenter la compréhension des processus menant à la genèse des traceurs et proxies tels que les effets vitaux, la déconvolution et la hiérarchisation des facteurs contrôlant le proxy et la temporalité et la localisation des paramètres et processus dont il témoigne.

En second lieu, il est également primordial de tracer les étapes successives menant à l'archivage des proxies et traceurs qui obscurcissent l'interprétation des archives. Une meilleure compréhension des mécanismes et délais des transferts et transports jusqu'au lieu d'archivage ainsi qu'une quantification des traceurs en regard de la biomasse des organismes source devront être plus systématiquement mis en regard de l'intensité des phénomènes dont ils témoignent ou des réservoirs de matière dont ils sont issus.

Enfin, les modalités et hétérogénéités d'archivages ainsi que les transformations post-archivage (taphonomie, diagenèse) affectant les traceurs devront être mieux caractérisées pour éclairer comment et avec quelle intégrité les proxies et traceurs rendent compte des changements reconstruits en P&P.

B 2.2.2 Dissocier les signaux

L'analyse de plusieurs proxies du même paramètre dans la même archive (e.g. le couplage de divers paléothermomètres de la surface de l'océan tels que le degré d'insaturation des alcénones en C37 et la rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques pour les températures océaniques de surface) est une piste privilégiée pour permettre de dissocier le signal provenant de l'écosystème de celui issu des différents forçages environnementaux. Ceci peut être particulièrement prégnant lorsque que le signal est enregistré par l'intermédiaire d'espèces vivantes susceptibles de répondre à de multiples facteurs environnementaux affectant leur écosystème. Des avancées nécessaires en biogéochimie et en biominéralisation (des molécules à l'isotopie), devront se faire en liaison étroite avec des compétences en écologie, en biologie et en éthologie pour permettre de comprendre et interpréter le signal.

Les progrès attendus ont non seulement comme objectif de mieux comprendre les niches écologiques des organismes à l'origine des signaux, mais également d'identifier le rôle des virus et bactéries dans la formation des carbonates, argiles etc. (organominéralisation, porosité, etc.).

B 2.2.3 Enregistrement de la saisonnalité, de variabilité interannuelle à multiséculaire, et des événements extrêmes dans toutes les périodes

Les variabilités climatiques et environnementales à court terme (saisonnalité et variabilité interannuelle à multi-séculaire) sont extrêmes, souvent d'ampleur plus grande encore que les changements observés aux échelles glaciaires-interglaciaires. Elles interfèrent avec la formation des enregistrements de multiples proxies paléoclimatiques de diverses manières. D'autre part, les événements extrêmes peuvent être soit sur-représentés dans les archives climatiques (exemple des *flash-floods* dans les sédiments océaniques), soit sous-échantillonnés (voire absents) au sein même des archives (par exemple les cyclones).

Améliorer la compréhension de la façon dont les composantes saisonnières et des événements extrêmes sont enregistrés dans les différentes archives environnementales est un défi majeur pour l'interprétation des signaux paléoclimatiques et paléoenvironnementaux. Cette connaissance est essentielle pour étoffer les comparaisons multi-périodes et mieux identifier les facteurs clefs (moyennes, saisonnalité, variabilité) à prendre en compte pour déterminer la vulnérabilité des milieux aux différents facteurs affectant l'environnement. Les nouvelles approches chercheront par exemple à combiner des études multi-proxies et multi-sites, ainsi que des enregistrements discrets (analyses répétées de foraminifères individuels, analyses à hautes résolution des bivalves et coraux, cernes d'arbres, etc. Elles permettront d'étudier le continuum temps courts-temps longs et les interactions entre les différentes échelles de variabilité.

B 2.2.4 Utilisation des simulations résolvant la convection atmosphérique pour aider à interpréter les proxies isotopiques

La composition isotopique de la pluie tropicale, enregistrée, par exemple, dans les spéléothèmes ou les cires de plantes, est souvent exploitée comme proxy des taux de précipitation passés. Mais cette composition dépend aussi des propriétés de la convection, telles que son organisation spatio-temporelle, sa profondeur, et le type d'orages (cumulonimbus isolés, lignes de grain, cyclones tropicaux). Pour étudier comment ces propriétés sont enregistrées dans les proxies isotopiques, les simulations résolvant la convection atmosphérique, avec une résolution de l'ordre du kilomètre voire de la centaine de mètres, sont particulièrement pertinentes et encore sous-exploitées. Dans les années à venir, ces simulations permettront d'exploiter les proxies isotopiques pour des reconstructions plus fines des taux de précipitations et de la fréquence des événements extrêmes (paléo-tempestologie). Ces simulations permettront en retour de tester des hypothèses sur les processus en jeu dans certaines variations climatiques passées, tels que l'impact de l'organisation de la convection sur les chan-

gements de pluie et sur les gradients thermiques dans l'atmosphère tropicale.

B 2.3 INTÉGRATIONS D'ÉCHELLES DE TEMPS OU D'ESPACE, DE DONNÉES MULTIPLES OU DE DIVERS FACTEURS

B 2.3.1 Comparaisons ou intégrations modèles-données plus systématiques

Intégrer dans un ensemble cohérent des informations de diverses origines (physique, géochimique, écologique, archéologique) reste un défi majeur qui demande d'avoir des approches redondantes et de pouvoir tester la cohérence des reconstitutions ou des hypothèses énoncées. Les approches modèles données sont plébiscitées pour :

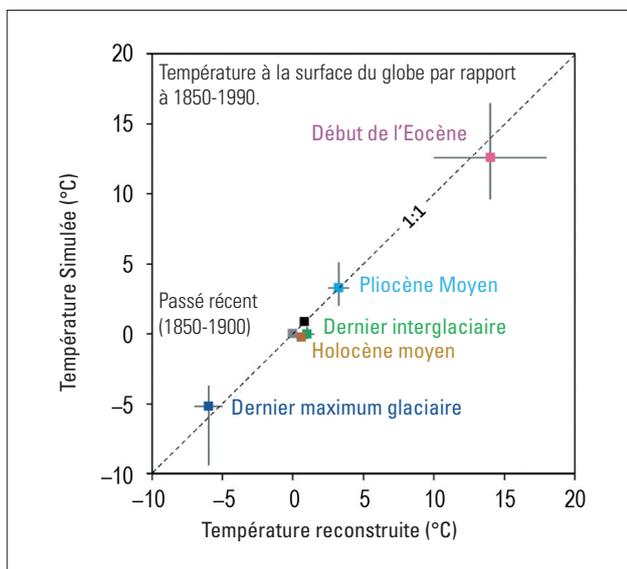
- comprendre les processus et identifier les variables ou contraintes environnementales apportées par les différents enregistrements ou types de reconstructions ;
- mettre en cohérence des informations disparates provenant de milieux différents et ayant des incertitudes sur les chronologies ;
- tester notre compréhension du système analysé.

La section 4 fait ressortir un grand intérêt pour ces approches mais révèle aussi que les rendre plus systématiques demande de relever plusieurs défis multidisciplinaires et d'avoir des agendas et objectifs communs entre les différents spécialistes. La formation aux outils informatiques et leur démocratisation doivent aussi permettre que les

intégrations ou comparaisons modèles-données puissent être tout autant au cœur des activités des spécialistes des reconstitutions environnementales que de celles des modélisateurs.

À titre d'exemple, l'étude des climats anciens et de leurs variabilités, enregistrées par les successions sédimentaires ou des surfaces géomorphologiques (e.g. surfaces latéritiques, vallées glaciaires paléozoïques) nécessite le développement de méthodes et d'interactions entre modélisation et données de terrain. L'étude de données dans un même contexte climatique mais dans des contextes géodynamiques différents permettra de discerner l'effet des différentes échelles de forçages (e.g. forçage tectonique local vs. global sur le climat local vs. global).

Bien que l'inclusion de facteurs physiques et biogéochimiques devienne de plus en plus fréquente dans les comparaisons modèles-données, ces types de comparaisons restent encore fragmentaires. Aborder de façon cohérente les questions scientifiques à l'interface avec les écosystèmes va de paire avec une meilleure intégration de comparaisons modèles-données feux /écosystèmes /hydro-systèmes sous leurs aspects climatiques, environnementaux et sociétaux. Les approches modèles-données prenant mieux en compte les facteurs anthropiques ou les facteurs climatiques et environnementaux sur les sociétés sont encore en balbutiement. Les périodes pré-quaternaires demandent aussi de considérer des facteurs d'adaptation ou de modifications radicales des écosystèmes.



B.2.3.1 Comparaison des changements des températures moyennes globales issue de reconstitutions et de simulations climatiques pour différentes périodes dans le passé, récent (1995-2014 CE), préindustrielle (1850-1900 CE), Holocène moyen (6.5-5.5 ka), le dernier maximum glaciaire (23-19 ka), le dernier interglaciaire (129-116 ka), le Pliocène moyen (3.3-3.0 ka), le début de l'Eocène (53-49 Ma). © Issue de la figure Box TS2 du résumé technique du 6^e rapport du groupe 1 du GIEC (2021).

Une partie des verrous à lever vient du fait qu'il faut faire appel à différents types de modèles, de raisonnements et compétences suivant les facteurs environnementaux et les questions soulevées. Ces études demandent aussi de se munir de méthodologies et de cadre de travail pour déterminer les échelles pertinentes de chaque information produite et la façon de les mettre en cohérence ou de réaliser des transferts d'échelle. Prendre en compte les différentes sources d'incertitudes ne fait pas simplement appel à la caractérisation mathématique des incertitudes mais aussi à la mise en commun de savoirs sur la façon dont les données sont acquises et traitées ou les modèles construits et utilisés. Relever ces défis et accroître les synergies modèles-données s'appuiera sur les nombreux développements anticipés dans les sections B 4 et B 5. Ces démarches et le développement d'une activité à part entière est indispensable pour comprendre les limites, les ruptures et instabilités des P&P mais également renseigner les possibles évolutions dans le futur.

B 2.3.2 L'apport de l'assimilation des données

L'assimilation des données est utilisée de façon routinière en météorologie pour la prévision du temps ou pour produire des réanalyses permettant de suivre l'évolution du climat sur quelques décennies. Ces méthodes combinent

de manière optimale la physique décrite par les modèles de circulation générale avec les informations provenant des observations disponibles tout en tenant compte de leurs incertitudes. Elle se développe en paléoclimats pour guider les trajectoires des simulations à partir de l'information climatique contenue dans les différentes archives. Les premiers exemples concernent les 1000 dernières années. Si une majeure partie du réchauffement climatique récent a été attribué sans ambiguïté aux facteurs anthropiques, on ignore toujours dans quelle mesure les anomalies climatiques observées au cours des périodes climatiques et environnementales préindustrielles peuvent être attribuées à la variabilité climatique interne générée par les interactions spontanées entre ses composants, ou à l'impact des forçages naturels (e.g. volcans, irradiance solaire, GHG, poussières). La variabilité climatique interne peut également masquer ou renforcer les tendances récentes au réchauffement. La généralisation de l'assimilation des données permet d'attribuer de tels signaux climatiques à une source spécifique. Une telle reconstruction du climat à l'aide de GCMs, de l'an 0 AD à 2014, en cours de réalisation, fournira également une nouvelle façon d'initialiser les modèles climatiques pour étudier la période historique, découvrir de nouveaux mécanismes qui sous-tendent la variabilité climatique naturelle, identifier des points de bascule et de nouvelles sources de prévisibilité qui pourraient entrer en action dans les années ou le siècle à venir.

B 2.3.3 Incertitudes liées à la variabilité séculaire à millénaire

Moins bien contraintes actuellement que la variabilité à court terme, la signature spatiale des anomalies climatiques, reconstituées à partir des données proxies, suggère un rôle important des variations climatiques internes associées à la variabilité à basse fréquence de la circulation océanique. Ces observations soulèvent également la question des conséquences de cette variabilité climatique passée sur les sociétés humaines et leur adaptation. Le poids de ces variabilités a aussi été mis en exergue dans les simulations transitoires de l'Holocène et peuvent conduire à des événements millénaires. Un enjeu est d'en mieux définir les origines et de s'interroger, en comparaisons avec des constructions multi-archives sur leur nature chaotique et sur la façon dont elle module la variabilité à plus court terme. De plus, la façon dont elle préconditionne la résilience des écosystèmes face aux événements extrêmes reste une question ouverte.

Les progrès des dernières années (résolution des échantillons, simulation longues) permettent d'aborder ces échelles, ce qui ouvre de nouveaux questionnements et demande de développer des méthodologies adaptées pour caractériser ces variabilités qui sont mal échantillonnées dans les données instrumentales de trop courte durée à partir des observations. En remontant dans le temps, la résolution des échantillons ne permet pas un phasage tem-

porel fiable entre les reconstructions en différents points ou issues des différentes archives avec assez de précision. L'accent sur ces variabilités devra être mis à la fois sur la caractérisation d'événements particuliers au travers d'études régionales multidisciplinaires, et sur des approches plus académiques pour mieux caractériser les signaux dans les différents milieux.

Les nouvelles approches pourront s'appuyer sur la reconstitution d'indices de la variabilité climatique à grande échelle (cf. section B 5). Ces reconstructions sont extrêmement précieuses pour étudier la dynamique de ses modes de variabilité, tels que l'oscillation nord atlantique, observés de manière instrumentale depuis moins de deux siècles. Elles permettront d'en explorer les variabilités multi-décennales et centennales, qui peuvent fortement influencer le changement climatique en cours. Elles apporteront également des informations pour établir des contraintes émergentes, actuellement déployée principalement à partir de la période récente, et contribuer à d'affiner les projections climatiques.

B 2.3.4 Reconstitutions régionales multi-facteurs

L'échelle régionale offre un cadre particulièrement intéressant pour développer des approches P&P intégrées. En effet, à cette méso-échelle spatiale, à l'interface entre l'échelle globale et celle des processus singuliers, les changements climatiques peuvent être considérés comme homogènes aux échelles temps de quelques années à quelques millénaires, exacerbant les modes de réponses aux autres paramètres forçant des trajectoires environnementales. Il est alors possible de mener des exercices de sensibilité en isolant les forçages par un choix expert des sites d'études. L'échelle régionale ou locale offre aussi des perspectives pour consolider et développer les approches croisées en comparant données climatiques, archéologiques, historiques, géographiques (migrations, aménagements), anthropologiques et ethnologiques (histoire des civilisations), biologiques (évolution humaine, etc.) et ainsi alimenter sans a priori les notions d'impacts et de trajectoires, d'évolution, d'adaptation et de résilience des sociétés humaines. Développer des approches interdisciplinaires multi-domaines (pour le CNRS: INSU, INEE et INSHS) en s'appuyant sur des connaissances locales et sur le réseau existant de dispositifs d'observation des dynamiques actuelles (OZCAR, ZA et/ou OHM) a été évoqué à plusieurs reprises.

Les défis des reconstitutions régionales viennent aussi du fait qu'une région est influencée par de nombreux facteurs externes et des réponses locales. Tout comme les études d'impact pour la période actuelle et future, les nouvelles démarches cherchent à identifier les événements conjoints et les effets en cascade qu'ils induisent.

Des régions et questions sont certainement à privilégier pour des approches intégrées. L'état des lieux fait apparaître plusieurs régions recevant une attention particulière de la

communauté P&P en France. Les fortes interactions entre les laboratoires permettent d'anticiper que les centres d'intérêt régionaux vont se poursuivre et se renforcer pour le secteur Austral Sud, le secteur Europe-Atlantique, le bassin méditerranéen et les régions tropicales. La perspective de long terme portée par ce livre blanc incite à ne pas favoriser une région par rapport à une autre étant donné qu'il n'y a pas eu de consensus à ce sujet dans les phases de consultation. Les priorités pour éviter de disperser les efforts seront à élaborer au fil du temps suivant l'évolution des thématiques et des opportunités.

B 2.4 CARACTÉRISER LES TRAJECTOIRES NATURELLES, LES PERTURBATIONS ANTHROPIQUES ET LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

La connaissance des dynamiques écologiques du passé montre qu'il n'y a jamais eu d'état stable qui pourrait servir de référence, tant les dynamiques écologiques sont soumises à de nombreux facteurs évoluant chacun suivant sa

propre cinétique : de la minute pour les précipitations orageuses à plusieurs dizaines de millénaires pour les glaciations, voire plusieurs millions d'années pour les orogénèses. Ce sont donc plutôt des trajectoires que les approches P&P permettent de mettre en évidence, mettant ainsi en perspective, dans un continuum temporel, les dynamiques de résilience, d'adaptation ou d'évolution en réponse aux perturbations, qu'elles soient d'origine anthropiques ou non. Fortes de la connaissance de ces trajectoires de long terme, les sociétés humaines pourront plus facilement identifier les perturbations qu'elles provoquent et/ou qu'elles subissent et tâcher d'y apporter des mesures de mitigation et/ou d'adaptation.

Les nouvelles possibilités permettent d'aborder de façon plus cohérente et multidisciplinaire ces questions de trajectoires aux échelles globale et régionale sous l'angle du climat ou de l'environnement et des différents types d'événements les ayant ponctués. Les travaux aborderont également la question des solutions à mettre en œuvre pour atténuer les changements globaux et s'interroger sur les

B 2.4 – Glacier Ampère, Kerguelen © D Brunstein



critères d'adaptation, en se servant des trajectoires passées, des informations sur les seuils et la résilience, ou d'exemples de rétroactions entre les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone.

B 2.4.1 Héritages du passé dans les dynamiques actuelles

L'information apportée par les trajectoires passées est aussi nécessaire pour clarifier un état de référence. De nombreuses réglementations, notamment européennes, visent à restaurer un « bon état écologique » des milieux servant de support à la vie humaine. Pour ce faire, il est courant de chercher à établir des états dits « de référence », cibles à atteindre des programmes de restauration. Cependant, dans des milieux anthropisés de longue date, de tels états échappent à la mesure directe car situés bien trop loin dans le passé. Les approches P&P apportent des informations pour reconstituer de tels états.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mener des études au sein d'espaces scientifiques intégrés, tels ceux portés par les concepts de socio-écosystème ou de zone critique. Ces espaces incitent à développer des approches holistiques qui nécessitent de mobiliser des disciplines variées dont les résultats seront intégrés dans le cadre commun qu'offrent l'espace et le temps, notamment aux méso-échelles. De telles interactions sont également indispensables pour tenir compte du fait que dans le contexte actuel de défis environnementaux, climatiques, et sociaux sans précédent, notre mémoire du passé n'est pas assez lointaine et pas assez riche des expériences vécues par la nature et les sociétés.

B 2.4.2 Un monde à fort taux de CO₂

Le dernier rapport du GIEC alerte sur le fait qu'en 2019 la concentration atmosphérique en CO₂ était supérieure à celle de toutes les périodes climatiques des derniers 2 millions d'années, et que les concentrations en CH₄ et N₂O sont supérieures à celles des derniers 800 000 ans. Les périodes pré-quatennaires fournissent des exemples de fonctionnement du système climatique dans des conditions de très fortes concentrations de GES et permettent de tester la capacité des modèles à simuler ces conditions. Au-delà de ces conditions extrêmes, les variations des concentrations et rapports isotopiques du CO₂, du méthane et de la teneur en oxygène atmosphériques indiquent que le cycle du carbone évolue avec des changements de sources et de réservoirs. Il est donc nécessaire de reconstituer cette trajectoire pour mieux contraindre les compartiments susceptibles de stocker ou libérer du carbone dans le futur et déterminer à quelle vitesse se déroule ces échanges. Cet aspect demande de mieux intégrer ces études des climats passés avec les études du climat actuel et futur. Au-delà de la curiosité scientifique guidant ces recherches, il s'agit de bien cibler les études multi-périodes ayant un fort potentiel vis-à-vis

des questions d'adaptation ou des objectifs du développement durable.

B 2.4.3 Extrêmes et bifurcations

Les notions de seuils, d'extrêmes sans précédents, d'événements abrupts, de point de bascule, de crises environnementales, d'aléas et de risques sous-tendent de nombreuses réflexions scientifiques en plein essor. Elles font l'objet d'une attention particulière pour de multiples aspects de la prospective. Répondre à ces questions demandera d'allier études statistiques et événementielles pour caractériser ces différents types d'événements et les seuils de non-retour. Ces analyses permettront d'évaluer statistiquement, et de manière plus robuste que sur la courte période instrumentale, les indicateurs des points de bascule issus de la théorie des systèmes dynamiques, mettant ainsi en lien direct les reconstructions paléoclimatiques avec les risques de survenue des points de bascule du système.

D'importants verrous sont donc à lever pour mieux caractériser les extrêmes et les bifurcations aux échelles globale et régionale afin de mieux décliner les facteurs d'impacts d'origine climatique, environnementale ou anthropique exacerbant les signaux. Un défi sera d'apporter des éclairages permettant d'identifier des facteurs d'alerte basés sur des analyses robustes qui tiennent compte de la complexité des multiples interactions faisant intervenir les écosystèmes et la société et leurs capacités de résilience. Pour traiter les différentes facettes de ces questions, difficiles à aborder mais aux enjeux sociétaux majeurs, il sera nécessaire de stimuler les interactions et partager une trame de travail, non seulement au sein des P&P mais aussi avec les scientifiques développant des approches similaires sur la période actuelle et les projections futures. Cela pourra se faire au sein de projets communs ou *via* des réunions de travail dédiées.

B 2.4.4 Contraintes émergentes

Les méthodes dites de contraintes émergentes se sont fortement développées ces dernières années, si bien que leurs résultats sont à présent utilisés dans les derniers rapports du GIEC. Ces méthodes consistent à contraindre la distribution des projections futures en utilisant la capacité des modèles à reproduire certaines variables observées actuellement. Ce sont principalement les observations instrumentales qui sont utilisées pour le moment, mais l'application aux données P&P et aux expériences PMIP restent une possibilité peu explorée aujourd'hui. Ceci s'explique par deux difficultés principales. La première concerne le manque de reconstruction globale des climats du passé avec des incertitudes raisonnables. Cependant, cette difficulté s'estompe de plus en plus à la faveur d'approches statistiques innovantes et du développement de bases de données paléoclimatiques de grande envergure. Le second défi concerne le manque de modèles contribuant à l'exercice PMIP4 qui

ne couvrent qu'une faible partie de l'ensemble des modèles CMIP6. Cependant le développement de telles approches de contraintes émergentes pour les paléoclimats pourrait permettre de progresser sur ces deux verrous, et certains cas tests mériteront d'être développés.

À ces questionnements, en continuité avec des avancées récentes et ancrés sur les modélisations globales, une réponse innovante sera d'abord ce type de problèmes dans toutes leur complexité à l'échelle régionale et pouvoir ainsi mieux renseigner les trajectoires régionales ou locales d'intérêt pour les sociétés. Un travail transverse et multidisciplinaire est nécessaire pour identifier les critères à prendre en compte, ainsi qu'une meilleure insertion dans les groupes régionaux favorisant la co-construction multi-acteurs en lien avec les différents secteurs d'activités ou les politiques locales.

B 2.4.5 Le niveau marin

La paléoclimatologie du quaternaire nous apprend que l'interaction climat-calottes de glace est hautement non linéaire (déglaciation, débâcles d'icebergs, etc.), que les remontées du niveau marin eustatique pendant certaines phases des déglaciations sont d'un ordre de grandeur supérieures à celles observées actuellement, et que ces remontées elles-mêmes sont un facteur de changement climatique. Il est donc essentiel pour les climats des siècles futurs d'explorer ces non linéarités dans toutes les composantes du système climatique. L'enjeu majeur sur ces points est de parvenir à mieux cerner la nature des rétroactions à l'origine des non-linéarités du couplage entre calottes et niveau marin eustatique, à la fois dans le contexte des interglaciaires du Quaternaire sous un climat à l'équilibre, mais également pour les siècles prochains sous un régime transitoire pour mieux évaluer la justesse des projections du niveau marin et l'évaluation des situations extrêmes, a priori peu probables, mais à fort impact.

Au niveau régional, le continuum terre-mer fait partie de zones vulnérables indicatrices des changements globaux. L'évolution du trait de côte à l'échelle locale résulte de l'interaction entre la variation eustatique globale du niveau marin, l'isostasie, qui contrôle régionalement le niveau de la croûte continentale en fonction des charges reçues (calottes glaciaires et chaînes de montagne), les rebonds, qui se propagent globalement quand ces charges varient (fonte des calottes), les flux de sédiments et les spécificités locales dépendant des interactions entre les marées, tempêtes et autres événements extrêmes (sporadiques et discontinus) et de la nature des substrats littoraux. Les tempêtes et les inondations constituent une menace pour les zones côtières, mais leur lien avec la variabilité et l'évolution du climat sur le long terme est encore mal compris. La paléo-tempestologie permet dans certains cas d'identifier les forçages, cyclicités et relations entre l'évolution du littoral et les événements extrêmes. La mosaïque des environnements aux échelles locales et la nature même des archives en domaine côtier rend les approches P&P difficiles à mettre en œuvre au-delà de la période Holocène. Ce domaine a pour objet d'établir des liens entre le niveau global des mers et les impacts locaux des événements extrêmes sur le long terme. Il devra être renforcé.

B 2.4.5 – Cabane La Mortadelle_Kerguelen. © A Gilbert



B3. Collecte et accès aux archives

B 3.1 ACQUISITION DE TERRAIN

L'acquisition de données relatives aux P&P passe en premier lieu par la collecte d'archives. Les axes scientifiques identifiés pour les prochaines années posent un certain nombre de questions pour bénéficier au mieux de la grande diversité des types d'archives et les difficultés d'accès à ces archives pour leur exploitation.

B 3.1.1 Meilleure couverture spatiale et temporelle

Augmenter la couverture spatiale est déterminant pour la reconstruction des gradients climatiques (latitudes, altitudes, distance à la mer), et permettre des comparaisons plus détaillées avec les résultats des simulations climatiques. En paléocéanographie, de nombreuses régions, telles que la zone intertropicale, restent encore largement sous-échantillonnées. Les efforts de campagnes en mer doivent donc être orientés vers des régions-clés telles que les océans Indien et Pacifique équatoriaux, difficiles à étudier en raison de leur isolement géographique, de leur immensité et de la difficulté d'obtenir des sites d'échantillonnages propices à la haute résolution temporelle. En domaine continental, des sites de carottage doivent entre autres pallier le manque d'enregistrements permettant de résoudre les changements globaux depuis des échelles allant du million d'années aux échelles orbitales et susceptibles de documenter les effets de seuils pour l'émergence des variabilités climatiques plus rapides, à l'échelle du Quaternaire et des temps géologiques. À l'autre bout du spectre chronologique, les enregistrements continentaux offrent la résolution et la densité spatiale nécessaires pour aborder les problématiques environnementales les plus récentes (de quelques décennies à quelques siècles) au plus proche des populations humaines. En outre, certaines régions de haute altitude sont encore peu documentées, à cause de la faible couverture spatiale et de la rareté des proxies (moraines glaciaires, lacs, spéléothèmes).

B 3.1.2 Meilleure exploitation des échantillons

Une meilleure planification de la répartition des échantillons permettrait de pallier la dichotomie entre les approches géochimiques (élémentaires et isotopiques) et les approches micropaléontologiques (pollens, microfossiles, etc.). Le couplage effectif de ces approches micropaléontologiques avec des outils novateurs (e.g. ADN ancien, traits physiologiques des organismes, traitement statistique bayésien) ouvre également la porte vers l'enrichissement des jeux de données sur les trajectoires de réponse de la biodiversité (résistance, résilience, bifurcation, effondrement) aux changements climatiques et environnementaux.

Ces combinaisons permettront non seulement d'acquérir de nouvelles informations concernant les trajectoires des paléocosystèmes mais aussi d'explicitier, voire de quantifier les interactions avec l'anthropisation (diffusions d'espèces liées à l'agropastoralisme, espèces végétales et animales natives, exotiques et/ou envahissantes) et leurs impacts/rétroactions sur le climat (effet de serre, albédo associé à l'usage des sols, etc.). À cette fin, des financements pour des campagnes de carottage ou de forage ciblées sur certaines zones-clés considérées comme des «hotspots» (Méditerranée, Arctique, Océan Austral, Antarctique, etc.) peuvent avoir un effet levier, en coordination entre les agences de financement et les opérateurs de recherche (organismes et universités). Ces campagnes d'échantillonnage ciblées devraient aussi viser à enrichir les corpus dans des espaces pauvres en données à toutes les échelles de temps (exemples de l'Afrique de l'Ouest, tropiques, hémisphère Sud, Asie du Sud-Est).

Des discussions et propositions ont aussi porté sur l'apport des restes humains dans l'ensemble des questions P&P. Ils font l'objet de réglementations strictes d'accès aux données, pour des aspects légaux et éthiques. Une réserve systématique de matériel permettant de créer un ADNothèque et de rassembler des données isotopiques ou autres marqueurs permettant de fournir des données environnementales permettrait aussi de mettre plus directement l'humain en relation avec son environnement et de renforcer les approches multidisciplinaires.

B 3.1.3 Les «rétro-observations»

Le terme de «rétro-observation» désigne la prolongation dans le passé des observations réalisées actuellement en ayant recours à des archives naturelles. Il suppose une période de recouvrement entre observations directes, d'une part, et reconstitutions par des traceurs mesurés sur archives naturelles, d'autre part, et désigne donc un champ particulier des «paléo-sciences», ancré dans la période actuelle.

Au cours des dernières décennies, le réseau d'observation de la Terre s'est densifié, que ce soit à distance (satellite) ou *via* des observatoires de terrain, souvent regroupés sous la bannière d'infrastructures labellisées. On peut citer dans le domaine de l'environnement, le réseau «Long-Term Ecological Research» et son pendant français LTER-France, regroupant les dispositifs «Zones ateliers» du CNRS et l'infrastructure de recherche d'observation de la zone critique «OZCAR», les «Services nationaux d'observation» regroupés en «Actions nationales pour l'observation» dans chacun des grands domaines de l'INSU, ainsi que les «Obser-



B 3.1.3 – Passerelle permettant l'accès à la canopée de l'Observatoire du chêne pubescent, site *in natura* d'expérimentation à long terme d'une sécheresse en région méditerranéenne, Saint-Michel-l'Observatoire, France.

© Yann SANCHEZ/CNRS Images

vatoires Homme-Milieu ». Le concept de rétro-observation offre un cadre conceptuel et l'opportunité de développer des études interdisciplinaires regroupant des spécialistes des dynamiques actuelles, quelle qu'en soit la nature, et des spécialistes de la reconstitution des trajectoires passées. Sur le plan fondamental, il promet des découvertes majeures en transposant la compréhension fine des processus environnementaux et géologiques actuels sur des périodes de temps caractéristiques de leurs évolutions propres.

Pour favoriser ce type d'approche, plusieurs pistes peuvent être suivies :

- La recherche d'archives naturelles à proximité des sites d'observation. Intégrer plus systématiquement un enregistreur naturel à un site d'observation permettrait de prolonger dans le passé les observations réalisées, mais également de créer des sites pilotes pour tester et développer de nouveaux proxies et marqueurs à transposer dans le registre P&P.
- Une meilleure bancarisation des échantillons et des données permettrait de s'appuyer sur un ensemble de résultats déjà acquis pour développer des recherches nouvelles répondant à leurs questions propres. Un démonstrateur de rétro-observatoire numérique a été déve-

loppé dans le cadre du réseau des Zones ateliers et ambitionne de servir de point de départ pour une initiative plus large. Pour cela, la gestion des collections d'échantillons de type archives naturelles devra monter en gamme pour dynamiser la gestion et la réutilisation par des équipes tierces, dans le respect du travail fourni pour les acquérir et les étudier.

- Une programmation scientifique incitative pourrait être mise en place, en coordination avec l'ANR et/ou les instituts du CNRS (par exemple *via* des appels à projets conjoints INSU/INEE), pour favoriser les échanges interdisciplinaires entre actualistes et les P&P.
- Renforcer ou faire émerger des infrastructures de type « écotrons » (pour étude en macrocosme, mésocosme ou microcosme), nécessaires à l'analyse des propriétés intrinsèques des organismes (cf. section B 4.1).

B 3.2 ARTICULATION AVEC LES MOYENS DE CAROTTAGE/FORAGE

La capacité à mener des campagnes de carottages/forages permettant de répondre aux questions scientifiques de plus en plus pointues dans les différents milieux tout en limitant l'empreinte carbone est un aspect critique de la prospective. Les rubriques ci-dessous détaillent quelques aspects spécifiques à prendre en compte dans l'évolution des moyens alloués par les différentes infrastructures de référence. Les porteurs des thématiques scientifiques souhaitent être partie prenante et pleinement associés aux futures décisions et développements autour de ces moyens.

B 3.2.1 Au niveau national

B 3.2.1.1 – En domaine continental

La plateforme de carottage, *via* l'instrument national « Carottage continental France » mise en place ces dernières années, gère un vaste parc d'instruments d'échantillonnages de terrain adaptés aux différents environnements et objectifs scientifiques (lac, terrestre, lagunes, tourbes). Cette infrastructure regroupe à la fois un parc national avec des personnels dédiés et des moyens matériels et humains présents dans les unités. Elle devra naturellement servir de tête de pont pour le développement de nouveaux outils, de centre de ressources pour la réalisation de missions, et de coordination pour la formation des personnels des unités. Adossée à un conseil scientifique, elle devra aussi être un lieu de discussion des priorités scientifiques, notamment pour les plus grosses opérations. Elle devra offrir la possibilité de recueillir des échantillons rares et de bonne qualité en domaine continental, mais également en domaine côtier peu profond, où les navires de la flotte océanographique française ne peuvent opérer. La dynamique lancée doit être poursuivie et accompagnée dans la durée.

B 3.2.1.2 – En glaciologie

Les infrastructures dans le domaine de la glaciologie ont une forte interdépendance vis-à-vis des projets scientifiques et de grandes infrastructures nationales/internationales avec de forts enjeux de soutien récurrents et de jouvence (accès et stations Antarctiques et TAAF, navires océanographiques ravitailleurs, etc.). La pérennisation des financements des moyens de forage est en cours *via* une labellisation nationale. La logistique lourde et les budgets importants mis en œuvre pour recueillir et analyser les archives glaciaires incitent à optimiser leur exploitation. L'effort qui est en cours pour mutualiser les analyses multi-proxy des carottes de glace, notamment *via* la plateforme analytique PANDA (IGE – LSCE), doit permettre d'avancer sur ces questions.

La prospective scientifique fait apparaître des besoins en termes de développement de moyens de forage rapide (destructif eau chaude ou broyage) et de sondes *in situ*, en particulier pour l'étude des interactions *ice-shelves* - océan et pour la recherche de glace très ancienne (collaboration avec la Suisse et le Royaume Uni). La prospective fait aussi ressortir le besoin d'un carottier d'altitude pour le projet « Ice Memory ». La communauté exprime enfin l'importance de développer les liens entre forages glaciaires et forages du socle rocheux sous-glaciaire.

B 3.2.1.3 – En océanographie

L'évolution des moyens de carottage en milieu marin est une source d'inquiétude pour les activités P&P. La France est, grâce au navire océanographique Marion Dufresne (MD), le seul pays au monde à pouvoir déployer un carottier de 70m de long (Calypso) permettant de recueillir des séries sédimentaires couvrant jusqu'à 1 million d'années dans des zones à forts taux de sédimentation. Le carottier Calypso



B 3.2.1.1 – Carottage Saco da Cotia, Brésil.

© B. Turcq

équipe également le Pourquoi Pas ? (PP) et l'Atalante, mais avec des capacités nettement réduites par rapport au MD (~ 35m pour le PP et ~15 m pour l'Atalante). La réforme prévue du Marion Dufresne en 2032 menace donc la pérennité du carottage long en France, outil indispensable pour reconstruire les climats du Quaternaire et, en particulier, la période couverte par les enregistrements glaciaires. Le couplage des enregistrements océaniques et glaciaires est pourtant primordial pour comprendre la dynamique d'évolution du climat car l'océan est le principal acteur des variations naturelles des GES et du transport de chaleur vers les hautes latitudes. La communauté des paléocéanographes souhaite être impliquée dans la préparation du cahier des charges du navire qui remplacera le MD et espère que ce navire sera en capacité de rayonner dans toutes les mers du globe (en particulier l'Atlantique Nord et le Pacifique). Il faudra des moyens humains et des capacités de développement R&D pour maintenir l'expertise et les capacités exceptionnelles de carottage qui existent actuellement dans la FOF et pré-



B 3.2.1.3 – Mise à l'eau du carottier CALYPSO, Campagne Amaryllis, N/O Marion Dufresne. © A. Duhayon

server - voire renforcer - notre leadership international. L'Ifremer a mis sur pied un groupe de travail pour le suivi et l'amélioration des moyens de carottage de la FOF.

B 3.2.1.4 – En domaine côtier

En raison de leur position à l'interface continents/océans, les régions côtières vont être l'objet d'une attention scientifique de plus en plus importante dans les prochaines années. Les dépôts sédimentaires du plateau interne (embouchures estuariennes et deltaïques externes, offshore proximal) sont des archives essentielles pour la paléocéanographie et la paléoclimatologie, en particulier pendant l'Holocène (évolution naturelle puis empreinte croissante de l'anthropisation). La demande est forte mais, dans la plupart des cas, ne nécessite que du carottage court (< 10-15m). Malheureusement, il n'existe plus de moyens de carottage faible longueur/faible profondeur à la FOF, ni dans le parc national d'instrumentation océanographique de l'INSU. La communauté souligne l'importance de disposer d'un système de carottage performant, permettant une bonne pénétration dans des sédiments pouvant être sableux, et une récupération optimale. Un dossier pour l'acquisition d'un vibro-carottier avec une mise en œuvre à partir de l'un des bateaux de la FOF (semi-hauturier) est en cours de montage (GT « carottage » FOF).

B 3.2.2 Préserver et renforcer l'articulation européenne et internationale

B 3.2.2.1 – Infrastructures internationales continentales

En milieu continental, il est indispensable de renforcer les participations françaises aux projets ICDP pour avoir accès à des archives anciennes et profondes caractérisées par des successions sédimentaires continues ou spécifiques. C'est aussi un levier important pour créer des synergies à l'international en faisant émerger des projets explorant différentes échelles de temps et d'espace, et alliant différentes spécialités. La faible participation française à ces appels d'offre, surtout en tant que P.I., a été pour partie reliée au fait qu'il n'y a aucun guichet en France qui permette de cofinancer des forages surtout quand ils sont en dehors du territoire national (cf. section 4). Il faudra une réflexion au niveau national, voire européen, pour envisager des appels d'offre spécifiques permettant de cofinancer ces forages. La même réflexion doit être menée afin de financer une partie de la recherche post-forages au travers de financements de contrats doctoraux ou post-doctoraux spécifiques.

B 3.2.2.2 – Infrastructures internationales en glaciologie

Les coûts logistiques des grands projets de forage glaciaire les placent nécessairement dans un cadre international. Le TGIR Concordia (base permanente franco-italienne au centre de l'Antarctique) est un support logistique essentiel à (1) l'appui du forage de carottes de glace sur les échelles de temps courtes et longues (i.e. projet européen BE-OI), (2) la préservation à long terme de carottes de glace provenant de glaciers de montagne menacés par le réchauffement du climat (projet international Ice Memory, <https://www.ice-memory.org/>), et (3) la compréhension des processus en conditions extrêmement froides et arides. La pérennisation de cette infrastructure à gouvernance internationale requière une agilité budgétaire suffisante pour s'adapter aux évolutions du coût de l'énergie et aux besoins de rénovation, tout en continuant d'assurer la sécurité des personnels sur place

B 3.2.2.3 – Infrastructures internationales marines

Comme indiqué dans la section 4, renforcer la participation des équipes française dans le TGIR ECORD/IODP est important pour bénéficier de l'investissement de la France dans ce TGIR (4M€/an) et accéder à des séquences sédimentaires longues. Les consultations menées pour ce livre blanc font ressortir que, pour les enseignant-chercheurs, les délégations CNRS motivées par une participation à une expédition IODP, a fortiori en tant que co-chef de mission, est une piste à poursuivre. Néanmoins, les décharges d'enseignements déposées au sein des universités pour une année (CRCT) ne sont souvent pas suffisantes, lorsqu'elles sont acceptées. Les Universités devront anticiper en amont et avec plus d'implication l'accompagnement des enseignants-chercheurs qui désirent s'impliquer dans ce type de mission.



B 3.2.2.2 – Station Concordia, Dôme C, Antarctique. © Eric ARISTIDICNRS Images

Pour les objectifs quaternaires, jusqu'à présent, les campagnes de forage IODP lourdes et complexes à mettre en œuvre ne sont pas (ou mal) adaptées et ne répondent pas au besoin de couverture géographique dans certaines zones clé des océans. Pour ces objectifs, la communauté se tourne plus facilement vers les outils de carottage de la FOF. Ces aspects sont à prendre en compte dans l'évolution des moyens de forage de la FOF.

Au niveau européen, la structure EUROFLEETS permet d'accéder à 27 navires (14 navires de haute mer, 13 navires côtiers) *via* des appels d'offres centralisés. Côté français, seule la Thalassa (hauturier) est intégrée dans cette structure, mais ne réalise pas de carottages longs. Sur les 14 navires hauturiers d'EUROFLEETS, seuls 2 navires permettent de carotter jusqu'à 20-25m, ce qui est très clairement en deçà des capacités actuelles de carottage de la FOF. Une réflexion sera donc nécessaire au niveau européen pour le futur du carottage, et en particulier du carottage long, de façon à optimiser l'utilisation des navires et répondre aux différents types de besoin.

B 3.3 CAROTHÈQUES, LITHOTHÈQUES, COLLECTIONS : VERS UNE STRATÉGIE NATIONALE RESPECTANT LES PRINCIPES FAIR

Le manque de description des données est l'un des freins principaux à une plus grande intégrabilité des données entre projets de recherche et entre disciplines, notamment dans l'optique d'une plus grande interaction entre modèles et données. Il limite également la réutilisation d'échantillons prélevés dans le cadre d'un projet antérieur pour de nouvelles études, démarche souhaitable dans une logique de rationalisation de l'effort de recherche et de réduction de son impact environnemental. La généralisation d'une gestion des échantillons répondant aux principes FAIR (pour l'anglais « Findable, Accessible, Interoperable, Reusable ») est enfin ontologiquement nécessaire pour répondre aux objectifs de la science ouverte, inscrits dans la loi de 2016 pour une République numérique, et transcrits dans les exigences des agences de financement *via* les plans de gestion des données.



B 3.3 – Espace réfrigéré du Centre de Ressources en Échantillons et Archives Marins CREAM, Plouzané, France.

© G. Leduc

La mise en place d'une véritable stratégie nationale de gestion conservatoire des échantillons est identifiée comme le meilleur moyen pour progresser dans cette voie. Des pistes pour élaborer et mettre en œuvre une telle stratégie sur les plans organisationnel, pratique, mais également éthique sont développées dans les différentes sous-sections.

B 3.3.1 Revalorisation des missions anciennes et des archives déjà collectées

Certains échantillons n'ayant pu être exploités (par manque de moyens financiers et humains) mériteraient d'être analysés pour répondre à de nouvelles problématiques et/ou de nouveaux développements de traceurs. De même, des centaines d'échantillons actuellement stockés sous la responsabilité des unités de recherche pourraient être mobilisés pour de nouvelles études. Certains proviennent de zones désormais inaccessibles en raison de l'évolution des contextes géopolitiques. Permettre et encourager la réutilisation de ces échantillons seraient une source importante de nouvelles découvertes et s'inscriraient dans une démarche responsable, d'économie de moyens et de réduction de l'empreinte carbone de notre recherche. Une plus grande attention sur le potentiel existant favoriserait également les analyses multi-proxies.

De fortes incitations à revisiter ces archives dans les nouveaux projets sont nécessaires, par exemple en favorisant de manière systématique et revendiquée dans les appels à projets les études capitalisant les analyses prévues sur une/des archive(s) déjà disponible(s) et/ou exploitée(s), et en rentabilisant l'exploitation du matériel existant et des sous-produits d'analyses (résidus de traitement en laboratoire, surplus de biomatériau extrait ou traité, etc.). Néan-

moins, ce type d'approche ne pourra être entièrement effective que si le recensement des échantillons et la bancarisation des données bénéficient d'une véritable organisation à l'échelle nationale prenant en compte les spécificités des données P&P. Parmi celles-ci figure notamment la relation entre profondeur et âge, qui est cruciale pour donner une valeur aux données, mais également évolutive, au fil des différents efforts de datation et de l'évolution des techniques géochronologiques.

B 3.3.2 Gestion conservatoire des échantillons : aspects organisationnels

La communauté scientifique potentiellement intéressée est suffisamment vaste pour justifier un niveau d'organisation intégré au niveau national. Pour autant, le dernier rapport sur l'état des collections géologiques² recense un nombre restreint (N<10) d'acteurs principaux dans le domaine de la gestion des carottes sédimentaires. La mise en réseau de ces acteurs serait ainsi profitable à une large communauté scientifique. Pour mettre en place cette organisation, les consultations mettent en avant le besoin de :

- créer un réseau national de dépôts d'échantillons accompagnant la mise en place de pratiques de gestion répondant aux principes FAIR, pour faciliter l'établissement des plans de gestion de données des équipes de recherche et pour coordonner l'articulation entre terrain, laboratoires, plateformes analytiques et infrastructures de recherche ;
- créer une procédure de labellisation nationale des dépôts d'échantillon pour standardiser les pratiques et assurer un suivi-qualité de la gestion des échantillons ;
- créer une interface de discussion débouchant sur des recommandations de pratiques, à la fois vers les personnels concernés et vers leurs établissements de tutelles, et vers une reconnaissance de ces activités de création de connaissances de plus en plus complexes.

2- <https://www.calameo.com/read/006460587e3e64bf8b283>

Pour atteindre ces objectifs, après analyse de la situation (section A 2), il ressort qu'une stratégie basée sur 3 niveaux de labellisation doit être mise en œuvre: local, régional et national (figure B 2.3.1). Ces trois niveaux correspondent aux 3 phases successives du cycle de vie d'un échantillon, à savoir:

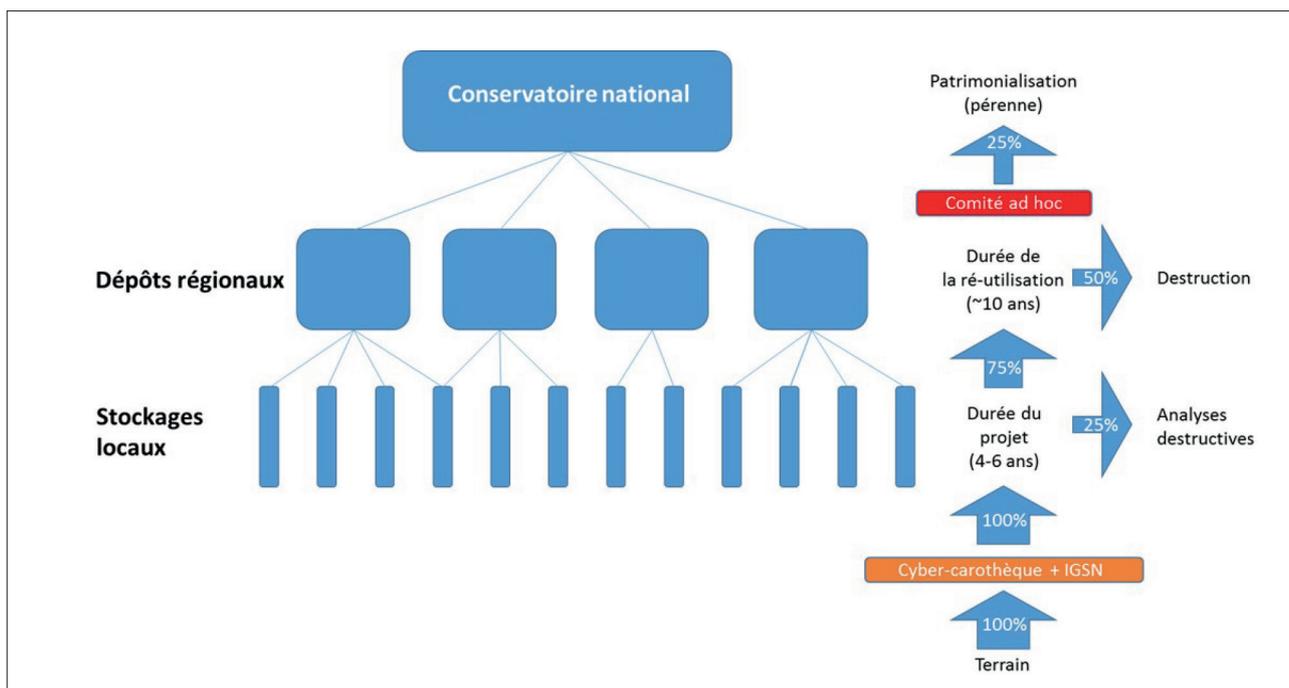
- Les dépôts locaux correspondant au stockage initial pour la durée d'un projet, typiquement de 4 à 6 ans. Durant cette phase, la plupart du temps dans l'unité de l'investigateur principal, l'échantillon peut être partiellement ou complètement détruit à fins d'analyse, sur place ou dans une unité de recherche ou de service. Il est donc crucial que ses métadonnées et qu'un maximum de données soient conservées pour une éventuelle réutilisation du site ou une comparaison avec des échantillons proches;
- Les dépôts régionaux correspondent à des stockages intermédiaires sur des durées moyennes à longues, au cours desquelles l'échantillon pourrait être réutilisé pour des études ultérieures à celles ayant prévalu initialement à sa récupération. Cette durée est typiquement d'environ 10 ans, la réutilisation étant généralement maximale après la publication des premiers résultats et s'étiolant par la suite. Les dépôts régionaux devront être localisés à proximité ou au sein des unités de recherche principales offrant des capacités analytiques spécifiques par types d'archives. Une spécialisation de ces dépôts semble envisageable (e.g. carottes sédimentaires lacustres, marines, ou littorales, spéléothèmes, cernes d'arbres, tourbes, fossiles, séquences de roches). Les unités en charge de ces

dépôts de moyen terme pourront recevoir la mission d'organiser la mise à disposition des échantillons qui leur seront confiés pour des études ultérieures, ce qui demande aussi qu'elles puissent disposer des moyens humains pour le faire;

- Un ou deux dépôts nationaux devront être mis en place pour accueillir les échantillons dont le caractère patrimonial aura été attesté par un comité *ad hoc*. Ces échantillons pourront ainsi être conservés pour les générations à venir. Un dispositif spécifique pourra être mis en place pour y accéder, en favorisant les approches non destructives propres aux objets de collection patrimoniaux et en proposant de manière incitative la valorisation scientifique d'archives non traitées lors des premières phases du cycle de vie, ou pouvant bénéficier de nouvelles approches analytiques.

Cette structuration en 3 niveaux devra s'appuyer sur des labellisations différenciées pour chacun des types de dépôts d'échantillons. Ces labellisations correspondront à un gradient d'exigence en termes de conservation et de restriction d'accès et à un financement et un accompagnement humain en adéquation.

Figure B 2.3.1 – Ébauche de stratégie nationale de gestion des échantillons de type « carotte », fondée sur 3 niveaux de labellisation et tenant compte de la durée de vie de l'échantillon. Les principales fonctions à assurer seront : i) l'établissement d'un mode de référencement unique pour 100% des échantillons prélevés ii) la qualité de conservation, iii) la traçabilité des échantillons et de leurs traitements, iv) l'incitation à la réutilisation, v) la patrimonialisation sélective de certains échantillons, après validation par un comité *ad hoc*.



B 3.3.3 Gestion conservatoire des échantillons : aspects pratiques et technologiques

Les différentes consultations amènent à distinguer 4 types d'outils nécessaires à l'accompagnement des échantillons durant l'ensemble de leur cycle de vie, depuis les missions de terrain jusqu'à la publication des données :

- 1- Sur le terrain : des données aussi exhaustives que possible doivent être collectées de manière standardisée pour permettre la caractérisation et la reproductibilité de la prise d'échantillon, y compris les petits carottages réalisés par des moyens propres dans certaines unités. Cette fonction est prise en charge aujourd'hui par la cyber-carothèque nationale ou les infrastructures (FOF, ECORD/IODP).
- 2- De retour au laboratoire : les échantillons et toutes leurs déclinaisons (sous-échantillons) doivent être référencés par un identifiant garanti au niveau international ; cette fonction est partiellement couverte aujourd'hui par l'instance d'allocation des identifiants IGSN, portée par le CNRS-INSU. Celle-ci doit cependant être renforcée et consolidée en prévision de l'intensification de son usage. La localisation des échantillons doit être consignée et mise à jour régulièrement : plusieurs unités ont choisi pour assurer cette fonction l'application collec-science, cependant la pérennité de cette solution et son déploiement à large échelle restent à consolider.
- 3- Pendant les manipulations : toutes les opérations (échantillonnages, traitements physiques, chimiques, etc.) doivent être consignées dans un cahier de laboratoire électronique, ce qui augmentera fortement la qualité et facilitera l'archivage et le partage par la suite. Le CNRS préconise actuellement l'application elab-ftw³. Celle-ci, ou une application similaire, devra être généralisée dans les unités et notamment dans les nœuds du réseau Ré-GEF.
- 4- À l'issue de chaque phase de création ou de traitement numérique des données, un jeu de métadonnées exhaustif et respectant des standards internationaux permettra la reproduction de l'opération. Il devra être associé à un jeu de données complet et décrit, déposé dans un entrepôt de données répondant aux principes FAIR.

B 3.3.4 Gestion conservatoire des échantillons : aspects éthiques et d'accompagnement au changement

La récupération des échantillons puis l'archivage et la traçabilité de l'ensemble des étapes de leur cycle de vie va soulever des questions à l'échelle nationale sur la valorisation de l'investissement lourd, en temps et en ressources humaines. Ce point n'a pas été abordé en profondeur par le groupe de travail du livre blanc, mais il est essentiel pour nous permettre de répondre aux exigences de la science ouverte.

La mise en place et l'appropriation de pratiques standardisées par les différentes communautés concernées est indispensable pour garantir la bonne adéquation entre les standards préconisés, les pratiques et les moyens des équipes. Il faudra valoriser l'investissement de tous les acteurs de la chaîne de production des connaissances. Parmi les solutions pratiques déjà identifiées, la numérotation DOI des rapports de campagnes et la publication de « data papers » post-campagnes font partie des moyens encore peu utilisés qu'il faudra développer car ils sont demandés par la communauté et par les instances chargées d'évaluer la réalisation des objectifs en regard de l'investissement initial de montage des campagnes.

Les bonnes pratiques de catalogage et de suivi des échantillons devront s'appuyer sur des outils performants, adaptés aux spécificités des laboratoires et des thématiques. Cela permettra de faire gagner du temps et de l'efficacité aux unités de recherche souvent confrontées à la gestion de très grandes quantités d'échantillons en raison de leurs nombreuses années d'activité.

Un aspect complémentaire est l'attention donnée aux agents des institutions de recherche partant à la retraite afin que leurs archives ne soient pas perdues (expérience, collections, notes de terrain, etc.). Ces aspects rejoignent les besoins de numérisation, d'encadrement et de formation pour garder l'expertise attachée à ces données.

3- <https://www.elabftw.net/>; <https://qualite-en-recherche.cnrs.fr/gt/cahier-de-laboratoire/>

B4. Développements analytiques

B 4.1 CALIBRATION DES TRACEURS ET DES PROXIES PAR APPROCHES DE LABORATOIRE OU DE TERRAIN

Le développement des méthodes analytiques et expérimentales s'est accompagné d'efforts constants pour améliorer la calibration des proxies et traceurs utilisés dans les reconstructions P&P. Cela s'est traduit par l'augmentation du nombre de sites de calibration et d'exercices d'intercalibration, l'amélioration et la standardisation des protocoles d'analyse, des développements instrumentaux, etc. Afin de poursuivre ces efforts et améliorer la compréhension des processus de fossilisation des signaux P&P autant du point de vue qualitatif que quantitatif, plusieurs approches méritent d'être développées et mieux exploitées.

En outre, une meilleure coordination pour exploiter les prélèvements de sédiments sub-actuels (sommets de carottes prélevés par des carottiers « interface ») pourrait être mise en place, par exemple en offrant aux équipes la possibilité de verser systématiquement dans un conservatoire national un doublon des sections de surface prélevées lors de carottage marins, lacustres ou de tourbière. Cette mise à disposition systématique à la communauté pourrait être un levier très efficace pour renforcer les efforts de calibration. Enfin, dater plus systématiquement encore que cela n'est fait à l'heure actuelle les enregistrements récents (couvrant le dernier siècle) à l'aide de radioéléments de courtes périodes permettrait de comparer directement les séries temporelles à la fenêtre instrumentale, afin de remettre l'amplitude des changements P&P reconstruits dans le contexte de la variabilité climatique et environnementale actuelle. À cette fin une coordination et un soutien au niveau national des plateformes offrant la possibilité de réaliser ce type de mesure pourrait être un accélérateur intéressant.

Au vu de la multiplication des Zones ateliers, des sites instrumentés et Services nationaux d'observation, il apparaît opportun de s'appuyer davantage sur ces sites et services qui peuvent être considérés comme sous-exploités pour la calibration des traceurs et proxies. Une utilisation plus systématique de ces sites de recherche pour aborder les thématiques P&P permettrait une meilleure prise en compte de la multitude de paramètres physiques et chimiques entrant en synergie dans la calibration des traceurs et proxies émergents. Par exemple, coupler les analyses P&P aux efforts de calibration que peuvent potentiellement offrir les SNO et les plateformes d'expérimentation (telles que celles par exemple répertoriées au sein du réseau AnaEE-France⁴), permettrait de tracer l'assimilation chimique des éléments d'intérêt en fonction des espèces pour une meilleure calibration / quantification des effets vitaux et au cours de la

mise en place des tissus. Ces sites instrumentés et l'expérimentation en laboratoire sous des conditions contrôlées sont des outils privilégiés pour la compréhension du fonctionnement des proxies et leur calibration. En domaine continental en particulier, cela permettrait de systématiser une approche méthodologique commune incluant les spécialistes des proxies, de mieux appréhender les proxies émergents fondés sur des molécules organiques et des signaux qui y sont associés, et de faciliter la création de référentiels actuels manquants (moléculaires, isotopiques, génomiques, etc.).

B 4.2 MÉTHODOLOGIES INNOVANTES

Depuis la prospective de Garchy (1998), des avancées technologiques spectaculaires ont permis de développer des outils analytiques visant à mieux caractériser les P&P. Ces avancées représentent dans certains cas une véritable révolution dans la compréhension des variabilités P&P ainsi que dans la caractérisation des processus en jeu dans la formation des signaux. Ils permettent enfin d'affiner notre interprétation et la mise en contexte P&P des données géologiques, sédimentaires, glaciaires et archéologiques.

B 4.2.1 Datations

Pour l'amélioration des chronomètres, le développement de méthodologies adaptées aux différents éléments est essentiel. Ces développements analytiques, associés à un accès facilité aux moyens de dosages des isotopes radioactifs classiquement utilisés à cette fin (²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am) faciliteront les datations et accéléreront les recherches de nouveaux marqueurs (e.g. isotopes du plutonium pour distinguer les différentes origines des retombées radioactives dues aux essais nucléaires) pour augmenter le cortège de marqueurs chronologiques en lien avec l'histoire environnementale, du local (e.g. occurrence d'événements climatiques ou géodynamiques extrêmes) au global (pollutions globales, éruptions volcaniques stratosphériques, interaction avec l'espace extraterrestre), en passant par le régional (histoire des pratiques menant à des contaminations spécifiques, connaissance des dates d'introduction d'espèces exotiques, etc.).

Des développements dans la technique de préparation des échantillons permettront aussi d'effectuer des mesures dans les sédiments sur des échantillons de très petite taille (en lien avec le MICADAS pour le ¹⁴C, pour les datations ^{δ40}Ar dans la glace) ou d'effectuer des mesures multiples sur les mêmes échantillons afin d'optimiser l'utilisation des archives climatiques précieuses (e.g. ³⁶Cl, ¹⁰Be sur les

mêmes échantillons de glace que les mesures d'isotopes de l'air piégé dans les bulles d'air).

De même, il y a un grand intérêt à développer les outils géochimiques permettant de déterminer les taux de sédimentation de manière quasi-continue entre deux points d'ancrage, tels l' ^3He extraterrestre (apporté par les micro-météorites) ou le ^{230}Th .

Enfin, certaines techniques de datation sur des périodes récentes dont l'expertise était bien développée en France ont disparu alors que le besoin est important, notamment pour la spatialisation dans l'étude du changement climatique récent (e.g. pour les glaces polaires: ^{137}Cs , spectrométrie alpha et gamma).

B 4.2.2 Mieux exploiter les archives

Les nouvelles approches développées récemment permettront d'exploiter au mieux certaines archives, en particulier:

- d'acquérir des échantillons jusqu'alors inexploités (inclusions fluides des spéléothèmes et évaporites représentant des échantillons de pluie) pour reconstruire les paléotempératures et les paléoprécipitations;
- de mesurer certains marqueurs quantitatifs (acides gras hydroxylés) et certains isotopologues sur des fractions sédimentaires inexploitées (isotopologues de l'oxygène des silicates pour reconstruire le ^{17}O -excess, proxy de l'humidité atmosphérique) ou sur des systèmes isotopiques encore sous-exploités (isotopologues des carbonates pour reconstruire le $\Delta^{47}\text{CO}_2$, paléothermomètre isotopique) pour tracer des variables-clés indépendamment de biais inhérents aux méthodes bien établies qui obscurcissent les signaux et en permettant une comparaison avec des marqueurs écologiques pour comprendre les spécificités des proxies;
- de réaliser des mesures isotopiques et géochimiques sur des analytes toujours plus petites et/ou complexes, afin de développer de nouvelles approches analytiques (e.g. analyses sur foraminifères individuels qui permettent d'extraire la variabilité climatique et/ou environnementale plutôt que leurs moyennes dans des fenêtres temporelles ciblées);
- d'acquérir à partir de l'analyse des isotopes stables appliqués aux minéraux qui se développent en milieu cassant (e.g. bassin, structures fragiles) et ductile les signatures de paléofluides (e.g. météoriques, métamorphiques, magmatiques) qui ont circulé dans la lithosphère à toutes les échelles de temps géologiques. Dans le cas des paléoprécipitations, ces signatures permettront de reconstituer les paléoreliefs à différentes périodes ciblées de l'histoire de la Terre;
- de développer et d'exploiter de nouvelles méthodes historiques émergentes (squelettochronologie, analyses multi-isotopiques séquentielles sur la dentine archéologique,

logique, cémentochronologie, exploitation des informations enregistrées par la croissance des tissus ligneux - au-delà de la dendrologie), qui permettront *in fine* de développer des méthodes de comparaisons plus fines entre les données archéologiques et les longues séquences naturelles (voir également le chapitre B 1.2.3.1);

- de systématiser des mesures innovantes en géochimie organique et biologie moléculaire, (ADN ancien pour caractériser la présence/absence des taxons végétaux, animaux et/ ou bactériens, voire viraux) et de développer la paléoprotéomique, de la paléogénomique et autres « omiques » pour une meilleure caractérisation de la biodiversité.

B 4.2.3 Méthodes d'apprentissages et statistiques pour l'acquisition des données

Le développement concomitant des méthodes d'apprentissage profond appliquées à des intelligences artificielles et des instruments d'acquisition de données à haut débit, ouvre également un nouveau champ pour la paléoclimatologie. Les reconstitutions paléoclimatiques s'appuient très fortement sur l'utilisation de bioindicateurs marins et continentaux (foraminifères, pollens, radiolaires, coccolithes, diatomées, charbons, etc.). Au cours de la dernière décennie, des imageurs haut débit ont été commercialisés ou développés pour l'acquisition d'images de ces bioindicateurs. L'arrivée de méthodes d'apprentissage profond (e.g. réseaux de neurones convolutionnels), dont la précision s'approche de celle des taxonomistes, permet désormais des acquisitions massives d'images, leur classification automatisée et l'analyse automatisée de traits morphologiques. Pour les paléontologues travaillant sur les plus longues échelles de temps, l'utilisation de méthodes de digitalisation à haute résolution (CT-scans, stéréo, lidar) offre également des perspectives d'applications de méthodes d'apprentissage machine.

Cette approche *big data* des outils micropaléontologiques offre la perspective de reconstruire non seulement les compositions faunistiques et floristiques automatiquement, mais aussi de mieux comprendre les structures des populations, des mécanismes évolutifs (voire adaptatifs) de ces bioindicateurs. Parmi les enjeux méthodologiques liés à ces développements figurent le développement de chaînes de traitement récursives, permettant d'automatiser l'apprentissage après validation des reconnaissances, la détection de classes rares (imbalanced) pour lesquelles les jeux de données d'apprentissage sont par définition lacunaires, le développement de chaînes de traitements robustes pour les échantillons ayant subis des altérations, etc. En termes structurels, l'archivage et la FAIRisation de ces jeux de données d'images nécessitent également une réflexion collective, ainsi que la connexion avec des moyens de calculs mutualisés. Les reconstructions paléoclimatiques intègrent une phase de quantification des paramètres environnementaux à partir des données de proxies. Pour les bioindicateurs, les

4- <https://www.anaee-france.fr/>

fonctions de transfert ont été progressivement complétées par des outils statistiques, en apprentissage (Artificial Neural Networks), et plus récemment des statistiques basées sur les processus et des statistiques bayésiennes.

Les réseaux de neurones ouvrent aussi la possibilité de réaliser de façon automatique l'interprétation morphométrique des dépôts glaciaires bien datés (database Alpine ICE-D <http://alpine.ice-d.org/>), ceci afin de reconstruire des paléolignes d'équilibres glaciaire (paleoELA). Actuellement, ces reconstructions sont très chronophages et donnent les résultats hétérogènes lorsqu'elles sont réalisées à l'échelle de chaque vallée glaciaire par différentes équipes de chercheurs. Cette métrique est indispensable pour transformer les fluctuations glaciaires en variables climatiques, telles les températures et les précipitations. Une automatisation de cette approche a le potentiel de fournir une densité de données inédite pour documenter les gradients de températures verticaux (lapse rates) et régionaux, ou reconstruire de cartes de paléoprécipitations.

B 4.3 NOUVEAUX INSTRUMENTS

L'essor des méthodologies va de pair avec le développement de nouveaux instruments, toujours plus sensibles et précis. Les transformations analytiques récentes qui nécessitent la poursuite d'efforts pour mieux exploiter les progrès technologiques majeures concernent en particulier le développement de nouveaux instruments permettant des analyses :

- durant des missions de terrain (adaptation des méthodes d'étude des carottes de glace «classiques» aux carottes de glace des versants raides, sondes de forage glaciaire pour mesures in-situ, moyens d'analyses rapides sur le terrain sur coupes naturelles ou carottages sédimentaires, analyseurs élémentaires et spectromètres laser de terrain pour une chimie isotopique précise des eaux avec possibilité d'embarquer sur des navires, etc.);
- toujours plus précises, simplifiées et/ou sur des quantités de matériel toujours plus réduites (analyse isotopique intra-moléculaire de molécules organiques (sucres, cellulose) par ^{13}C -RMN, microtomographie à rayons X (XCT-scan) pour caractériser la structure, la texture et la composition des dépôts sédimentaires en 3D et les relier aux modes de mise en place lors du dépôt, les méthodes de Fourier-Transform Mass spectrometry (FTMS) ouvrant la porte à l'identification au niveau moléculaire des composés organiques et organométalliques - quantifications organiques sédimentaire non destructive et à l'échelle millimétrique - et leurs rapports isotopiques précis dans des mélanges complexes pour évaluer des isotopologues auparavant inaccessibles, spectrométrie de masse par accélérateur pour les mesures du radiocarbone sur de très petites quantités (MICADAS), méthodes en spectrométrie optique applicables à de nombreux traceurs pour plus haute résolution temporelle et une meilleure précision, mesures d'aimantations plus rapides et plus économes

en gaz tels que les magnétomètres à pompage optique et les magnétomètres SQUID à haute température, etc.);

- sur des analytes avec des méthodes innovantes de purification préparatoires, ou dont les caractéristiques chimiques étaient auparavant peu exploitables (étapes préparatoires en chromatographie gazeuse ou liquide haute performance pour isoler des cétones, des stérols, des acides aminés, etc. pour analyses isotopiques et datations a posteriori, biomarqueurs moléculaires plus polaires que ceux classiquement analysés en chromatographie gazeuse tels que les acides gras hydroxylés, etc.);
- de plus en plus automatisées (automates de préparation des échantillons pour la géochimie élémentaire et isotopique pour augmenter les résolutions temporelles - *sample throughput*, automates de criblage optique et géochimique de tri de microparticules (microfluidique, cytométrie, automates de tri MiSo pour les foraminifères, etc.).



© P. STROPPA / CEA.

Dans le cadre des moyens nationaux de calcul intensif mis à disposition de la communauté par GENCI, les calculateurs Jean-Zay du centre de calcul du CNRS(IDRIS) et Juliot-Curie du centre de calcul du CEA (TGCC) sont utilisés pour les simulations paléoclimatiques. Ils permettent aux chercheurs, français comme européens, de réaliser des simulations numériques haute performance et d'analyser les flots de données ainsi générées dans des domaines scientifiques très variés.

B5. Modélisation, simulations, intelligence artificielle



© Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Images.

L'approfondissement de la représentation des processus physiques ou biogéochimiques bénéficie pour une grande part de l'avancée des connaissances et de la modélisation pour les conditions actuelles. Néanmoins, les conditions passées mettent l'accent sur des interactions, des rétroactions ou des processus engendrant des changements à long terme négligés pour l'étude de l'évolution récente du climat et qui constituent des priorités de développement pour les étudiant.

B 5.1 ENRICHIR LA PANOPLIE DE MODÈLES POUR COMPRENDRE ET INTERPRÉTER LE SIGNAL PALÉO

B 5.1.1 La construction d'outils de modélisations simplifiés, conceptuels, en boîte ou intégrés multi-facteurs

La modélisation du climat vise deux objectifs complémentaires: simuler et comprendre. En paléoclimatologie, on

observe souvent des changements climatiques ou environnementaux sans en connaître véritablement les causes ou les mécanismes sous-jacents. Il est donc utile d'explorer différents scénarios à l'aide de modèles de complexité réduite, avant de s'aventurer dans des simulations numériques longues et coûteuses en temps de calcul. Ces bases conceptuelles peuvent aussi fournir un cadre d'analyse de modèles plus complexes. Deux types d'exemples vont guider les prochains développements.

Sur le Quaternaire, les calottes de glace et le carbone pilotent le climat terrestre, mais les liens de cause à effet restent peu clairs. Notamment, si les entrées en glaciation (115kyrBP) précèdent la baisse du CO₂, l'augmentation du CO₂ précède la déglaciation (11kyrBP). Ce schéma, observé sur le dernier cycle, semble robuste et a servi de base à des modèles conceptuels. Cependant, ce type de modèle devrait mieux prendre en compte les variations paléoclimatiques observées à plus haute fréquence (événements de Heinrich ou de Dansgaard-Oeschger) qui ont un rôle majeur

lors des transitions, mais aussi les variations à plus long terme (MPT, transition Paleocène-Eocène, etc.) mettant en jeu des mécanismes encore mal identifiés, impliquant sans doute le cycle du carbone sur le long terme.

Sur les plus grandes échelles de temps (1Ma et plus), le lien entre forçage astronomique et cycle du carbone a été peu exploré, bien qu'il soit très bien identifié dans les enregistrements géologiques. Construire une théorie astronomique du cycle du carbone reste un défi majeur, dont la solution pourrait apporter des éléments d'explications aux grandes transitions géologiques observés au Cénozoïque, voire à des périodes plus anciennes.

Le développement des modèles simples du système climatique pourra aussi être poursuivi en représentant les composantes rapides (dont l'atmosphère) non plus de manière dynamique, mais de façon statistique ou thermodynamique comme cela a été proposé par l'approche de la maximisation de la production d'entropie.

B 5.1.2 Modélisation pour les datations et l'établissement des chronologies

La chronologie des archives paléoclimatiques est un problème complexe en raison du manque de contraintes de datation absolue, en particulier au-delà de la limite imposée par la demi-vie du ^{14}C . Il est souvent nécessaire de combiner différents types de contraintes chronologiques ou méthodes de datation sur chaque enregistrement. Il peut être utile de combiner aussi différentes archives en utilisant des points de calage stratigraphiques (e.g. tephres) entre les archives. Afin de mettre en cohérence les contraintes de datation absolue et stratigraphique pour chaque enregistrement et obtenir la meilleure datation finale avec des barres d'erreur robustes, des modèles probabilistes ou bayésiens sont utilisés.

Pour les glaces polaires, il est nécessaire de déterminer deux âges: l'âge de la glace et l'âge des bulles d'air, ce dernier étant plus jeune du fait de la profondeur de piégeage qui peut dépasser 100m. Pour combiner les différentes sources d'information chronologique, des modèles probabilistes comme Paleochrono ont été développés et prennent en compte les informations glaciologiques (accumulation, amincissement, profondeur de piégeage) et les contraintes de datation absolue et issues de synchronisation stratigraphique. Ce modèle peut inclure des carottes de glace et d'autres archives. Les enjeux futurs se situent autour de deux axes. D'une part, les utilisateurs doivent être formés à ces modèles pour que leur utilisation devienne une évidence. D'autre part, ces modèles peuvent être encore développés, par exemple pour prendre en compte les probabilités non-gaussiennes et pour automatiser la synchronisation d'enregistrements.

B 5.1.3 Modélisation directe et inverse pour reconstituer le climat ou l'environnement

Les modèles de surface continentale (dynamique de la végétation naturelle) ou de biogéochimie marine offrent de plus en plus de possibilités pour représenter le fonctionnement de grandes familles d'écosystèmes. Ces modèles permettent par méthode inverse, c'est à dire en déterminant les variables climatiques en entrée du modèle permettant la simulation des écosystèmes reconstruits, de déterminer les caractéristiques climatiques et environnementales compatibles avec les reconstructions. Ce type d'approche sera étendue à la modélisation d'archives climatiques comme les coraux, les spéléothèmes ou les arbres, en interaction avec des partenaires en France et à l'international.

Ces modélisations des archives climatiques se multiplient dans tous les milieux, ainsi que des modèles permettant de comprendre les processus élémentaires d'acquisition du signal dans les sédiments ou les glaces. Ils permettront aussi d'avoir une meilleure compréhension des différentes composantes entrant en jeu dans le signal climatique et environnemental final. L'exploration de multiples facteurs (saisonnalité, profondeur, espèces voire préservation) et la façon dont ils sont imprimés dans différents types d'archives climatiques permettra *in fine* une meilleure interprétation des résultats des analyses géochimiques ou des assemblages floristiques ou faunistiques.

D'autres avancées vont pouvoir s'appuyer sur le développement de modèles dits de « paysages » (e.g. Badlands, LandLab, Fastscape, et plus récemment gospl). Ces modèles permettent de faire l'interface, à l'échelle globale et à haute résolution, entre les processus de la terre interne et le climat, afin de reconstruire les paysages à la surface du globe, en prenant notamment en compte l'incision des rivières et les flux sédimentaires. À terme, leur couplage avec les modèles de climat ouvre de nouvelles voies de recherche pour comprendre l'évolution des environnements.

B 5.1.4 Modèles d'évolution et d'impact intégrant les changements environnementaux ou sociétaux

Plusieurs outils ont émergé permettant de faire le lien entre changements climatiques et environnementaux. D'une part la modélisation de distribution spatiale des espèces, encore appelée modélisation des niches écologiques, permet de prendre en compte des scénarios de changements climatiques passés ou futurs pour inférer les zones favorables à l'établissement de telle ou telle espèce. Ces modèles (e.g. Maxent) sont notamment beaucoup utilisés pour la compréhension de l'interaction spatio-temporelle des néandertaliens, humains et pré-humains avec leur environnement à toutes les échelles de temps (e.g. dispersion au Pliocène, interaction avec les mégafaunes à l'Holocène). Par ailleurs, de nouveaux modèles vont permettre, forcés par des simu-

lations numériques du climat, d'estimer les déplacements (dispersion) et la spéciation au cours du temps, proposant ainsi des cartes de biodiversité dans le temps (e.g. modèle GEN3SIS). Enfin, les avancées de la phylogénie moléculaire ont conduit au développement de modèles de spéciation et d'extinction qui peuvent être reliés à des forçages abiotiques, i.e. environnementaux (e.g. RPANDA). Utilisés en combinaisons avec les proxies paléoclimatiques et les simulations numériques des paléoclimats, ces modèles permettent de revoir l'influence des paléoenvironnements sur l'évolution du vivant.

B 5.2 DÉVELOPPEMENTS DES MODÈLES SYSTÈME TERRE UTILISÉS POUR SIMULER LES PALEOCLIMATS

Deux modèles sont principalement développés et utilisés pour les simulations paléoclimatiques en France. Le modèle iLOVECLIM est un modèle de complexité intermédiaire permettant l'accès aux temps longs. Les développements de iLOVECLIM sont directement portés par l'équipe de modélisation du climat du LSCE, en collaboration avec la Vrije Universiteit Amsterdam (Pays-Bas). Le modèle de l'IPSL est un modèle du système Terre (ESM) dont les développements reposent sur différents laboratoires coordonnés par le centre de modélisation du climat de l'IPSL. Une version dédiée à l'étude des paléoclimats, IPSL-CM5A2, a été développée et publiée en 2020. Le projet PEPR TRACCS (2023-2030) doit aussi permettre d'accélérer le développement du modèle de l'IPSL, notamment en ce qui concerne son cœur dynamique. À ces développements s'ajoutent les spécificités propres aux paléoclimats, notamment les isotopes et traceurs et la capacité à réaliser des simulations multimillénaires qui doivent aussi être pérennisées.

B 5.2.1 Renforcement des interactions sur les développements des modèles iLOVECLIM et IPSL

Bien que les contraintes de développements soient différentes entre iLOVECLIM et le modèle système Terre de l'IPSL, les principaux objectifs de développement se rejoignent, à la fois par le partage de composantes communes (e.g. le modèle de calotte de glace GRISLI) mais surtout grâce à des échanges de plus en plus nombreux entre les développeurs des deux types de modèles. Ces échanges sont centrés sur le partage de la modélisation de processus, en particulier pour les liens entre les modèles de biogéochimie marine (respectivement PISCES pour IPSL et OCYCC pour iLOVECLIM), impliquant des portages de paramétrisations du modèle d'océan NEMO, composante océan du modèle de l'IPSL, au modèle d'océan CLIO, composante océan du modèle iLOVECLIM. De même, une thèse est en cours où certains processus de surface bénéficiant d'une résolution explicite dans le modèle ORCHIDEE seront portés implicitement dans le module de végétation d'iLOVECLIM. Enfin, des tests de mécanismes dans iLOVECLIM à grande échelle

de temps et/ou sur des ensembles de simulations ou encore des méthodes d'ajustement impliquant des temps totaux de simulation très longs seront porteurs d'enseignement pour mettre en place des configurations avec les modèles plus lourds comme le modèle de l'IPSL.

B 5.2.2 Évolution des contenus des composantes et des couplages

L'accroissement de façon modulaire de la complexité des modèles et l'augmentation de la cohérence entre les couplages des différents milieux resteront des axes de développement majeurs dans les prochaines années. Une plus grande attention devra être portée aux surfaces continentales, et plus particulièrement la représentation de la dynamique de la végétation naturelle et des interactions entre la végétation, le sol, l'hydrologie, et les interactions végétation/feu en dynamique. L'intégration de façon plus systématique des différents réservoirs d'eau comme les lacs et les interactions entre le cycle de l'eau de surface et de subsurface (aquifère) devraient aussi permettre de mieux prendre en compte les constantes du cycle de l'eau continental et les échanges entre le continent et l'océan. Ces différents développements se feront également en intégrant et revisitant le cycle du carbone et ses interactions aux différentes échelles de temps avec les cycles de l'eau et de l'énergie. Les poussières et aérosols atmosphériques devraient être aussi intégrés de façon entièrement interactive en bénéficiant des développements de leur représentation minéralogique et une meilleure intégration avec une chimie interactive. Il en est de même pour le rôle de l'ozone et le couplage avec les variations du rayonnement solaire. Les calottes de glace devraient devenir des composantes à part entière des systèmes couplés, dont la complexité et la capacité à représenter des phénomènes de petites échelles spatio-temporelles continueront de progresser. Afin de pouvoir comparer de façon plus systématique les résultats des simulations aux reconstructions climatiques et environnementales, les versions de modèles devront intégrer en standard la représentation des différents traceurs biogéochimiques et la modélisation des isotopes de l'eau et du carbone.

B 5.2.3 Prise en compte des constantes longues dans les ajustements des modèles

L'intégration des contraintes propres aux simulations des paléoclimats dans les objectifs de développement des modèles est cruciale. Ces dernières incluent notamment le design et le maintien de grilles spécifiques (exemple du modèle NEMO) et la nécessité d'avoir des codes stables dans des conditions extrêmes (e.g. très fortes concentrations en CO₂ atmosphérique). Les défis concernent aussi les besoins propres à la mise en équilibre des modèles pour étudier des climats dont les conditions sont éloignées des conditions actuelles. Des méthodes d'accélération des conditions de forçage ou de l'ajustement du modèle doivent être explorées pour réduire les temps de calcul. Cet enjeu permettra

à la fois de réduire la consommation énergétique pour des phases de calcul longues qui ne sont pas exploitées par la suite et le temps de restitution pour les projets scientifiques. Ces aspects demandent de porter une attention sur les composantes lentes du système aux échelles multiséculaires à millénaires encore peu étudiées. Enfin des aspects méthodologiques doivent permettre de progresser sur la capacité à avoir des évolutions du trait de côte ou de la représentation du niveau marin, de l'extension des lacs ou des mers internes ou les grandes simulations transitoires. Ces aspects remettent en avant le besoin d'une réflexion sur les fermetures de bilans énergétiques, hydrologiques et des différents cycles biogéochimiques sans lesquelles il n'est pas possible d'étudier de façon fiable la sensibilité de ces paramètres aux différents forçages.

B 5.2.4 Une meilleure articulation entre modélisation globale et régionale

L'utilisation de configurations régionales des modèles se généralise avec l'utilisation de la version zoom de LMDZ ou le modèle couplé océan-atmosphère de la Méditerranée. La focalisation sur l'échelle régionale de la prospective incite à anticiper une généralisation de besoins autour de ces configurations. Des travaux spécifiques devront pouvoir généraliser l'utilisation des zooms en couplé océan-atmosphère et de la possibilité d'avoir un couplage dans les 2 sens entre la configuration globale et un zoom régional pour identifier les rétroactions des changements régionaux représentés finement sur la grande échelle. De la même façon, les méthodes de descente d'échelle statistique vont se généraliser. L'ensemble de ces évolutions est aussi indispensable pour mieux répondre aux questions d'érosion ou d'archéologie qui nécessitent de très fines échelles spatiales aux longues échelles de temps, ce qui répond à des critères difficiles à concilier du point de vue de calcul haute performance.

B 5.3 MODÈLES-DONNÉES POUR UNE MEILLEURE CARACTÉRISATION DES FORÇAGES EXTERNES

Plusieurs aspects concernent également les reconstitutions des forçages externes utilisés comme entrée des modèles de climat. Pour certains, des développements spécifiques sont nécessaires pour une bonne implémentation de ces forçages dans les modèles selon le niveau de complexité et les liens avec les paramétrisations physiques ou biogéochimiques. Ces facteurs externes sont principalement le rayonnement solaire (paramètres orbitaux ou éclairement), le volcanisme et les modifications des paléogéographies liées à tectonique des plaques ou à la présence de calottes de glace. D'autres facteurs ont aussi besoin d'être reconstitués pour représenter les conditions de surface lorsque l'ensemble des composantes du système Terre ne sont pas considérées.

B 5.3.1 Volcans

Dans la poursuite des travaux des dernières années, une caractérisation approfondie des éruptions volcanique se poursuivra de façon à identifier plus finement les types d'aérosols, les espèces chimiques, les localisations et la saisonnalité des éruptions. L'implémentation dans le modèle bénéficiera des travaux menés dernièrement pour les simulations des mille dernières années.

B 5.3.2 Paléogéographie

La reconstruction de la paléogéographie repose sur les données paléomagnétiques qui permettent de restituer la paléoposition des blocs continentaux (en latitude et en orientation) à un âge donné. En complément, les paramètres cinématiques des océans permettent de contraindre la position relative des continents les uns par rapport aux autres (mais uniquement jusqu'à 180 Ma). Les archives sédimentologiques apportent de leur côté des informations sur les paléoenvironnements passés et contraignent, entre autres, la position du trait de côte qui varie en fonction de la déformation de l'écorce terrestre et de l'eustatisme marin. Certains événements géologiques restent néanmoins difficiles à reconstruire comme l'évolution bathymétrique des passages océaniques qui influencent les courants océaniques, mais surtout la paléo-topographie, en raison d'un nombre limité de données pour contraindre les paléoaltitudes. Lorsqu'elles sont disponibles, ces données concernent pour l'essentiel les grandes orogénèses du Cénozoïque mais sont entachées d'une large incertitude. L'amélioration de ces reconstructions paléogéographiques reste donc un prérequis indispensable dont dépend la capacité à simuler les climats pré-Quaternaire. Cela nécessite de poursuivre l'effort d'acquisition de données paléomagnétiques, pour contraindre la position des continents (notamment au Précambrien), ou de données permettant de contraindre les paléoaltitudes des reliefs. Cela implique également de développer des bases de données qui regroupent l'information nécessaire pour reconstruire la paléogéographie avec une résolution spatiale et temporelle aussi fine que possible.

B 5.3.3 Autres conditions aux limites

Pour de nombreuses simulations de la distribution des aérosols ou des zones de soulèvement de poussières, les changements de végétation ou de type de surface sont considérés comme des conditions aux limites. Les méthodologies vont évoluer en associant de plus en plus de résultats de simulations numériques et d'observations pour fournir des conditions aux limites les plus conformes aux informations disponibles pour les climats étudiés. Tout comme pour le climat futur, un accent sera aussi mis sur l'Holocène pour tenir compte de l'évolution de l'utilisation des terres depuis le début de l'agriculture et de l'élevage, en lien avec les groupes de travail internationaux travaillant sur ces sujets pour différentes régions du globe, en particulier dans

les projets du programme Future Earth, dont PAGES. Ces reconstructions devront s'inscrire dans une continuité par rapport à ce qui est actuellement disponible pour le dernier millénaire. De plus une vigilance accrue sur les questions de cohérence entre les périodes devra permettre d'étudier la transition passé/présent/futur de façon plus cohérente que ce qui se fait actuellement.

B 5.4 STATISTIQUES, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET INTÉGRATIONS MODÈLES DONNÉES

Le recours à des méthodes de plus en plus évoluées pour les comparaisons modèles/données et la reconstitution de variables ou d'indicateurs climatiques va se poursuivre. De nouveaux champs se sont ouverts avec l'assimilation des données et les contraintes émergentes pour le réglage des modèles ou l'évaluation des projections futures. Outre les méthodes inverses, de nombreuses méthodes se développent et sont basées sur les possibilités offertes par l'intelligence artificielle et l'exploration plus systématique des jeux de données. En support aux défis scientifiques présentés dans la section B 2, cette boîte à outil va s'enrichir.

B 5.4.1 Événements et causalité

Pour permettre à la fois d'identifier les événements et les chaînes de causalité, plusieurs méthodes basées sur les réseaux de neurones ou issues de la théorie des graphes, utilisant ou non l'entropie du signal pour identifier les changements de régimes ont vu le jour. L'enjeu sera de disposer de méthodologies permettant d'identifier les points de bascule, de caractériser des événements climatiques comme les événements El Niño ou des régimes de temps affectant les moyennes latitudes, ou des événements extrêmes dont des extrêmes rares mais générateurs de forts impacts. Ces méthodes permettront de mieux tirer parti de l'information variée issue des différentes archives climatiques et de la combiner aux résultats des simulations climatiques. Une expertise solide existe dans différents laboratoires mais elle devrait être mieux mise en réseau.

B 5.4.2 Recours aux émulateurs pour l'ajustement des modèles ou les contraintes émergentes

Les reconstructions climatiques et la confrontation modèle/donnée offre également la possibilité d'apporter des contraintes dans le développement et l'ajustement des modèles. Les avancées récentes sur le développement et l'application d'émulateurs et la proximité des équipes de modélisation paléoclimatiques avec les chercheurs impliqués sur ce type de sujet dans le programme de recherche TRACCS permet d'identifier la meilleure prise en compte de l'information paléoenvironnementale dans les développements des modèles comme un axe porteur. Les approches basées sur le développement d'émulateurs permettront aussi d'ap-

porter des contraintes sur les trajectoires de changement climatique, suivant ce qui a été initié pour proposer des trajectoires futures prenant en compte les informations des modèles et des observations récentes dans le dernier rapport du GIEC.

B 5.4.3 Reconstruction d'indices paléoclimatiques

Les méthodes permettant les reconstructions d'indices climatiques sur les derniers millénaires s'appuient habituellement sur la période de recouvrement entre enregistrements paléoclimatiques et instrumentaux pour mettre en place des modèles statistiques simples (e.g. régression linéaire). Des approches plus fines, s'appuyant toujours sur des approches en régression, mais utilisant l'ensemble des enregistrements disponibles (base de données internationale type PAGES2K, NEOTOMA, PANGAEA) et des méthodes avancées, incluant les approches non-linéaires de l'intelligence artificielle (e.g. forêts aléatoires), ont été développées récemment, et ont fait l'objet de la mise à disposition d'un outil logiciel ouvert à l'ensemble de la communauté (nommé ClimIndRec⁵). Ce type d'approche sera généralisé pour permettre des validations variées, aussi bien au sein de la méthodes statistiques (validation croisée), qu'en utilisant des modèles climatiques en mode « pseudo-proxies » qui permettent d'évaluer la pertinence de la méthode dans le monde du modèle.

B 5.4.4 Assimilation de données

L'assimilation des proxies climatiques dans les modèles de climat constitue un moyen puissant d'obtenir une reconstitution climatique globale cohérente et d'identifier les mécanismes clés des changements climatiques. Les premiers développements sont en cours de réalisation avec le modèle de l'IPSL pour les 2000 dernières années. Une solution théorique a récemment été développée pour pallier au problème de dégénérescence du filtre associé à la résolution d'un problème de grande dimension avec un nombre insuffisant de particules (ou de membres d'un grand ensemble). La méthode consiste à augmenter significativement le nombre de particules et utiliser un émulateur statistique du modèle couplé IPSL-CM6A, ce qui permet aussi de limiter les coûts de calcul élevés liés à l'utilisation d'un modèle de circulation générale. Cette nouvelle méthode qui fait appel à l'intelligence artificielle est intégrée dans la chaîne de production du modèle de l'IPSL. Ce filtre à particule avec ré-échantillonnage baptisé SIR-LIM (SIR pour Sequential Importance Re-sampling) est adapté pour l'étude des longues échelles de temps des paléoclimats. Il a fait sa preuve de concept, et permet aujourd'hui de guider au fil de l'eau les simulations du modèle couplé de l'IPSL par les séries climatiques issues des proxies tout en préservant la cohérence physique le long du processus d'assimilation.

5- cf. Michel et al. 2020

B 5.5 CALCUL

B 5.5.1 Simulations dimensionnantes

Les simulations paléoclimatiques réalisées avec les modèles système Terre posent plusieurs défis de temps de calcul et de performances HPC. Les rétroactions lentes du système imposent de réaliser des simulations longues et gourmandes en ressource de calcul. Il faut néanmoins garder des temps de restitution courts, ce qui impose de choisir des résolutions plus faibles que ce qui est utilisé pour le climat actuel et futur pour de nombreuses études, tout en ayant la possibilité de travailler à haute résolution pour les intégrations des couplages avec la calotte ou la représentation des surfaces continentales (végétation sous-maille, surfaces en eau, etc.).

La réalisation d'ensembles de simulations va se généraliser à différents types de simulations longues dans différentes configurations climatiques pour explorer les transitions, identifier des bifurcations ou points critiques, ou étudier les variabilités multiséculaires à multimillénaires. En ce sens la dernière déglaciation qui nécessite environ 20000 ans de simulation est un indicateur du type de simulation standard qui se profile d'ici une dizaine d'années, en parallèle ce sont des ensemble multi-cycles climatiques qui seront réalisés avec iLOVECLIM. Les longueurs plus standard resteront de l'ordre de 5000 ans pour disposer des statistiques suffisantes pour explorer les interactions entre les changements d'état moyen, les variabilités interannuelles à millénaires et les événements extrêmes.

Un autre dimensionnement des simulations va être lié au passage d'échelle entre des simulations globales et des simulations régionales, ou entre ces simulations et des simulations de proxies ou de résolution encore plus fine (comme des « Large Eddy Simulations ») pour étudier les processus. Ces intégrations devront pouvoir se réaliser à la volée au cours d'une simulation pour optimiser les temps de restitution des expériences, une expérience étant considéré ici comme l'ensemble des simulations cohérentes à mettre en œuvre pour un problème donné.

B 5.5.2 Dimensionnement des besoins en calcul haute performance

Les dimensionnements fournis ici ne considèrent que les simulations réalisées avec les modèles système Terre comme le modèle de l'IPSL pour lequel il y a actuellement une force de développement pour l'étude des paléoclimats et qui nécessite d'avoir accès à des calculateurs nationaux (Tier 1) ou internationaux (Tier 0, européens).

Les simulations actuelles pour le paléoclimat sont de 500 à 1000 ans de façon standard. Les simulations des derniers 6000 ans réalisées ces dernières années préfigurent la longueur d'une simulation standard dans les années à venir pour aborder des transitions climatiques ou environnementales. L'enjeu actuel en termes de dimensionnement et de type de simulation est de pouvoir simuler une déglaciation complète. Ce type de simulation devrait pouvoir être fait de façon routinière d'ici 10 ans. De mêmes ces simulations devront inclure en standard les traceurs et isotopes de l'eau

Version du modèle	Résolution LMDZ; NEMO	Nombre de cœurs	Nombre d'années simulées par jour	Nombre de jours pour 20 000 ans simulés
IPSLCM6 – LR	LMDZ 144x142x79; eORCA1.2	1952 cœurs LMDZ : 1 136 NEMO : 720	24 ans	835 jours
IPSLCM6 – LR avec isotopes	LMDZ 144x142x79; eORCA1.2	1 586 cœurs LMDZ : 1 136 NEMO : 450	12 ans	1 670 jours
IPSLCM7 – LR	ICO-LMD NBP40 eORCA1.4 (avec NEMO 4.2)	10 240 cœurs	90 ans	225 jours
IPSLCM7 – LR	ICO-LMD NBP40 eORCA1.4 (avec NEMO 4.2)	~90 millions d'heure- cœur	45 ans	450 jours

Tableau B 2.5.1 – Estimation du calcul nécessaire pour réaliser une simulation de 20000 ans avec la version actuelle du modèle de l'IPSL à basse résolution et le futur modèle basé sur le cœur dynamique DYNAMICO pour l'atmosphère. Les heures sont estimées par rapport à la machine AMD de Joliot-Curie (TGCC) utilisée actuellement. Pour ces estimations il y a recours à du dépeuplement (1 cœur sur 2) pour avoir des performances. L'estimation des coûts ne tient pas compte du modèle de calotte, ni des sophistications du modèles de surface continentale, qui représentent un facteur faible au regard de l'ensemble du modèle couplé.

et du carbone dans les différents compartiments. Les isotopes, en raison de l'ajout de variables dans le schéma de transport des modèles a un surcoût de calcul important. Pour l'océan, les isotopes ajoutent 3 traceurs et 25% de temps de calcul. Pour l'atmosphère, les isotopes ajoutent 6 traceurs et doublent actuellement le coût de calcul.

Le tableau B 2.5.1 donne une estimation de coût pour la version actuelle du modèle de l'IPSL à basse résolution et pour la prochaine version en cours de développement. Les simulations emblématiques resteront à la limite des possibilités des calculateurs et du temps humain associé, car elles mobilisent des versions complexes aux niveaux des contenus, des couplages et des manipulations de fichiers. L'archivage et le stockage des résultats des simulations font aussi face à des difficultés récurrentes ayant de multiples facettes : volume, traitement, diffusion, données prétraitées, accès, etc. Sur la base des simulations des derniers 6000 ans pour lesquelles un travail a été fait pour limiter le nombre de sorties et le volume de stockage, le stockage associé pour une simulation de 20000 ans est estimé à 76 TB, et nécessite environ 12000 inodes. Les exploiter nécessite de mettre en place une exploitation efficace de grands jeux de données et de pouvoir lever les restrictions actuelles sur le nombre d'inodes. L'évolution future passera certainement par une révision de la façon d'accéder aux données, sachant que l'existant devra rester accessible.

Bien que les aspects techniques soient bien pris en charge par l'équipe d'ingénieurs du centre de modélisation du climat de l'IPSL, un accompagnement informatique dédié aux paléoclimats est nécessaire dans la durée pour répondre aux besoins spécifiques des paléoclimats. Il est souhaitable que les spécificités P&P soient traitées au même niveau de priorité que celles liées au climat actuel, à la prévisibilité climatique ou du climat futur

Les principales questions actuelles concernent aussi l'évolution des calculateurs avec la prospective en cours pour l'exascale en France et le déploiement de GPU. Les verrous technologiques et scientifiques sont à intégrer dans les développements prioritaires des prochaines années. Ces sujets sont abordés dans le PEPR TRACCS et l'infrastructure de recherche CLIMERI-France. Actuellement, les activités paléoclimats sont bien représentées dans les instances de gouvernance et il faudra veiller à ce que cela reste le cas, avec une bonne symbiose entre science et technique.



B6. La gestion et l'exploitation des données

B 6.1 BASES DE DONNÉES ADAPTÉES AUX DIFFÉRENTS BESOINS

B 6.1.1 La place des P&P dans Data Terra

Pour rester performante et progresser sur la route du FAIR, la communauté P&P doit s'organiser pour disposer d'outils et de pratiques communes pour l'analyse des échantillons puis la diffusion des données.

Des initiatives *bottom-up* permettent d'ores et déjà à la communauté française de disposer d'outils de catalogage entre la mission de terrain et le laboratoire (CoreBook, Cyber-carothèque nationale⁶, Logs de mission de la Flotte océanographique française). Des outils de catalogage des échantillons sont en cours de développement (allocataire de numéro IGSN CNRS⁷, début de déploiement de solutions de gestion d'échantillons telles que CollecScience⁸). Ces pratiques sont à encourager et systématiser, ce qui passe par de la formation et des échanges réguliers entre les différents domaines concernés.

Cependant, le lien demeure incertain entre le terrain et le laboratoire. En particulier, le recours aux cahiers de labo électroniques (cf. Rapport du CNRS 2021⁹), et notamment l'archivage de protocoles décrits de manière standardisée, reste anecdotique. Les prochaines années verront un déploiement massif de ces nouvelles pratiques. Les données P&P couvrant une large gamme de disciplines, il faudra veiller à ce que les différentes approches et standards métier restent cohérents et compatibles. Il est aussi important que les porteurs de ces recherches multidisciplinaires puissent être force de proposition en tant que communauté, sans avoir à s'éparpiller dans de trop nombreux entrepôts de données et groupes de discussions associés.

Concernant le catalogage des données, une gestion FAIR tout au long du cycle de vie des échantillons et des données qui leur sont associées facilitera l'intégration des données aux catalogues et en particulier au catalogue national DataTERRA¹⁰. Ces points doivent être traités de façon cohérente en intégrant les questions d'archivage et de catalogage discutées dans la section B 3.3, les réflexions en cours dans le GT IGSN/Data RÉGEF et l'insertion dans les entrepôts de

données. Il faudra s'assurer que les données brutes ou non publiées qui sont stockées la plupart du temps dans des disques durs ou des serveurs locaux (OSU) soient dûment référencées pour de possibles utilisations ultérieures.

Pour atteindre ces objectifs, l'effort national devra se concentrer sur la place des données P&P dans DataTERRA, tout en permettant l'interfaçage avec les entrepôts académiques publics, comme l'entrepôt du ministère de la Recherche « RDG » (« Recherche Data Gouv »¹¹ ou ses « hubs universitaires »¹²), ou les entrepôts internationaux thématiques, comme ceux des consortiums PANGAEA ou NEOTOMA.

Compte tenu de la nature interdisciplinaire des données P&P, il est difficile de définir lequel des pôles de DataTERRA serait le plus à même de les accueillir. De plus, les données en P&P sont exprimées comme des séries temporelles, or les modèles d'âge sont susceptibles d'évoluer en raison, par exemple, de l'amélioration des outils de datation. Ces aspects propres aux données P&P demandent des outils adaptés et des développements propres à réaliser en concertation avec les différents pôles de DataTERRA de façon à bénéficier d'un catalogue spécifique, transversal à THEIA (dynamiques de surface), ODATIS (reconstitutions climatiques), Form@terre (données géologiques) et PNDB (biodiversité) pour accueillir ces données.

Suite aux différentes consultations, la création d'un Centre de données d'observation et de service (CDOS), nouvel outil proposé par l'INSU, dédié aux données « paléoclimats et paléoenvironnements » et hébergé au sein de DataTERRA, permet de répondre aux questions posées. L'hypothèse de création à court terme d'un tel CDOS est déjà en discussion. La mission de coordination de cette instance couvre la mise en place actions concrètes i) propres à la communauté P&P, ii) en lien avec des autres disciplines connexes en France et iii) au niveau international. En étant associée à l'expertise de propositions de projets soumis à la MITI ou ailleurs (au niveau international Working Group de Recherche Data Alliance¹³), cette instance permettra en d'assurer la cohérence entre les différentes initiatives. Elle permettra en outre de capitaliser sur les compétences en stockage des échantillons et en gestion des données présentes dans les différents

6- <https://www.cybercarotheque.fr/index.php>

7- <https://www.igsn.cnrs.fr/#/search>

8- <https://www.collec-science.org/>

9- <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-03563244/document>

10- <https://www.data-terra.org/activites/projets-techniques-scientifiques/projets-nationaux/les-projets-du-programme-dinvestissements-davenir/>

11- <https://recherche.data.gouv.fr/fr>

12- Université de Grenoble Alpes, Université de Lille, Université de Lorraine, Université de Paris, Université Paris Nanterre, Université de Strasbourg et le CNRS

13- <https://www.rd-alliance.org/groups/working-groups>

sites et laboratoires, en incluant les compétences techniques permettant de maintenir et faire évoluer les bases. Les ressources RH dédiées au sein de DataTerra ou du réseau permettront de mettre en place les entrepôts et favoriser l'émergence des services nécessaires pour créer les différents niveaux de bases de données (entrepôts, bases spécialisées, produits évolués) et permettre la diffusion des bonnes pratiques. Pour mener à bien ces missions, il est nécessaire que du personnel technique soit affecté à ce projet spécifique au sein de DataTerra pour coordonner les projets entre eux, veiller au respect des normes et standards et participer à leur réalisation.

Enfin, au-delà de la réflexion sur les nouvelles données, un effort doit également être consenti pour réveiller les données dormantes et faire en sorte qu'elles intègrent les catalogues et les nouveaux projets scientifiques. Ces aspects demandent des efforts lourds et ne pourront certainement voir le jour que si des financements sont fléchés sur ces initiatives. Le modèle de projets ciblés développé autour du partage de données comme l'AO CESAB-DataShare, pourrait être un modèle transposable à la communauté P&P.

Quelles que soient les évolutions, il faudra veiller à ce que ces activités de bases de données soient valorisées et reconnues dans les évolutions de carrière, que ce soit pour les chercheurs ou pour les ITAs. Elles reposent actuellement sur un trop petit nombre de personnes dont il est crucial de valoriser l'investissement dans des tâches collectives stratégiques.

B 6.1.2 Bases de données pour les simulations

Le stockage massif des sorties de modèles ne peut pas être facilement déplacé ou dupliqué. De plus, la modélisation doit aussi s'inscrire dans les objectifs de sobriété, ce qui demande des efforts sur la gestion des données. Il est aussi nécessaire de renforcer la capacité à diffuser les résultats auprès d'utilisateurs directement depuis l'archivage sur le centre de calcul, suivant le schéma développé dans le cadre des simulations CMIP et en respectant les critères de sécurité informatique.

La coordination du projet international « Paleoclimate modeling intercomparison Project » impose aussi d'alimenter et participer à la maintenance et à l'évolution des bases de données internationales. Par le passé les paléoclimats, *via* PMIP, ont directement contribué à la mise en place de la base internationale CMIP et, au travers de l'IPSL, de la mise en place de la base de données distribuée ESGF. Une étape importante pour les prochaines années sera de faire en sorte que toutes les simulations puissent effectivement être référencées suivant le même protocole et d'éviter la multiplication de bases de données de projet qui dupliquent les données et ne permettent pas leur traçabilité (gestion des

errata, traitement des calendriers internes de simulations, documentation des expériences, documentation des versions de modèles utilisées, etc.). Les données issues de simulations avec des modèles de complexité intermédiaire doivent aussi pouvoir être interfacées plus facilement dans les bases de données que ce n'est le cas actuellement.

L'ensemble de ces points doit s'accompagner d'une réflexion sur l'attribution de DOI aux simulations, et le statut des différentes simulations. Il est en effet important de distinguer ce qui est du ressort de simulations de référence internationales, références dans le cadre de projets spécifiques (nationaux ou internationaux), tests pour approfondir des résultats etc. Le niveau d'exigence doit être bien proportionné à la taille des potentiels utilisateurs et de l'investissement en calcul associé. A priori, l'infrastructure CLIMERI-France offre le cadre pour traiter ces questions.

B 6.1.3 S'inscrire dans le projet national Gaia Data

Les enjeux de la communauté P&P concernant l'interopérabilité des bases de données s'inscrivent assez naturellement dans le projet PIA Gaia Data¹⁴ qui a pour ambition de développer et mettre en œuvre une plateforme intégrée et distribuée de services relatifs aux données de recherche pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement. Ce projet repose en particuliers sur les Infrastructures de recherche DataTERRA et CLIMERI-France avec lesquelles la communauté P&P doit renforcer ses collaborations dans les années qui viennent.

Afin de tester les services développés par Gaia Data sur des cas représentatifs des différentes communautés P&P, nous avons démarré une réflexion pour définir des « cas test » représentatifs des activités P&P (i) des approches multi-proxies et (ii) des approches de comparaison modèles-données. Le premier cas explorera les besoins associés aux reconstructions climatiques ou environnementales intégrant les données issues de différentes archives (glaciaires, océaniques, terrestres) et type de données (géo-chimiques, ADN, microfossiles...). Le deuxième cas permettra de systématiser les comparaisons modèles-données en partant d'exemples déjà effectifs du projet PMIP (multi-modèles et multi-périodes). Un groupe de travail spécifique sera mis en place d'ici l'automne 2023.

B 6.2 PARTAGE D'EXPERTISE, PRODUITS ÉVOLUÉS ET SERVICES DÉDIÉS

Les éléments de prospective montrent que l'aspect fortement multidisciplinaire et intégrateur des recherches va s'intensifier dans les prochaines années. Une attention accrue sera portée sur l'échange de données et les comparaisons modèles-données. Chaque aspect requiert de la technicité et un accompagnement pour pouvoir mettre en place les différents outils et partager les nombreuses expertises.

14- <https://www.data-terra.org/actualite/gaia-data-enjeux-science/>

Différents types de services devront être mis en place pour accroître la cohérence, favoriser les échanges, valoriser les résultats et renforcer les interactions avec différents porteurs d'enjeux hors de la sphère académique.

B 6.2.1 Les services associés aux échantillons et bases de données

Plusieurs besoins ont émergé pour la mise en place, l'exploitation et la valorisation des bases de données. Les premiers concernent directement les entrepôts et bases de données en termes de coordination et d'assistance aux utilisateurs pour injecter leurs données ou extraire des données. Au-delà des données brutes, il faudra être en mesure de fournir et maintenir des outils collectifs permettant de favoriser les reconstructions multi-archives et multi-paramètres. Il faut aussi accompagner les laboratoires dans le travail de recensement d'échantillons en vue de leur exploitation, notamment en anticipant le devenir des échantillons orphelins lors des départs à la retraite.

Les seconds axes de développement concernent l'automatisation de la production de cartes ou de la mise à jour de produits évolués. Cela recouvre par exemple la possibilité de production plus systématique de cartes bio-géographiques et environnementales (forêts, températures, récifs coralliens, mangroves, etc.) par période chronologique. Les besoins couvrent toutes les périodes de temps, de l'échelle géologique à la période récente et échelles spatiales, du bassin versant à la Terre entière. Des événements clefs comme les entrées ou sorties de glaciation, des grandes crises, des points critiques de bascule pourraient aussi retenir l'attention. Des exemples pouvant servir de point de départ sont déjà disponibles.

La mise en place d'un portail commun permettant de recenser les réseaux d'expertise, les accès aux données ou la diffusion de produits évolués, comme des synthèses ou des indicateurs climatiques et environnementaux, est aussi nécessaire pour renforcer les interactions et la circulation de l'information. Des initiatives telles que « Climate Proxies Finder »¹⁴, peuvent servir de point de départ. Une telle initiative nécessitant un entretien perpétuel impliquerait par ailleurs l'existence d'un curateur permanent pour ne pas que le portail devienne rapidement obsolète.

La mise en commun de logiciels permettant l'exploration des données apparaît également comme un bon levier pour accroître les synergies et approches multidisciplinaires. Néanmoins chaque exemple requiert une expertise particulière et les mises à l'échelle pour des utilisations massives, la transférabilité d'un cas d'étude à un autre, la maintenance et l'évolution des contenus forment un ensemble de questions qui demandent une constante flexibilité vis à vis de nouveaux besoins de recherche. Plusieurs exemples ont

été cités lors des consultations, comme :

- ZA Timeline : logiciel développé en 2020 pour le Réseau des Zones ateliers. Ce logiciel possède une interface graphique permettant à l'utilisateur de représenter en temps réel (lors d'ateliers) des données temporelles hétérogènes encodées dans un tableur sous la forme d'une frise chronologique. Il est utilisé par plusieurs Zones ateliers pour la modélisation de leurs socio-écosystèmes ;
- Chrono-Rhône : application web interactive conçue en 2020 pour les besoins de l'Observatoire Hommes-Milieus Vallée du Rhône. Ce prototype comprend une interface frise chrono-systémique et une interface carte, ce qui permet à l'utilisateur de découvrir les événements historiques qui ont marqué l'évolution socio-environnementale du fleuve Rhône à la fois dans le temps et l'espace. La base de données contient 331 événements répartis dans 31 thèmes et six thématiques, ainsi qu'une base relationnelle représentant les liens de causalité entre les événements ;
- NAMO GéoWeb : plateforme de conception d'atlas web interactifs développée en 2020-2021 dans le cadre du programme Littoral de la Fondation de France (projet RestEAUR'lag) et d'un projet soutenu par le FEDER et la Région Guadeloupe. Cette plateforme propose aux utilisateurs un module de rédaction de cartes narratives. Elle permet de regrouper les données de différentes infrastructures de données géographiques impliquées dans un projet, et offre également la valorisation et la diffusion de cartographies thématiques *via* une rédaction collaborative et une publication en ligne.

B 6.2.2 PMIP et les simulations climatiques

Une analyse des situations des simulations réalisées dans le cadre du « Paleoclimate Modeling Intercomparison Project » servent non seulement pour les groupes de modélisations qui les produisent ou les projets scientifiques d'analyse, mais aussi à de nombreuses autres communautés. En particulier, les données sont téléchargées et utilisées par des écologues comme entrée de modèles de niches écologiques. D'autres besoins récurrents concernent la production à l'issue de ces simulations d'indicateurs bioclimatiques plus adaptés pour les comparaisons avec la végétation ou des indicateurs pour alimenter des réflexions sur les impacts, que ce soit sur les ressources (eau, nourriture) ou sur les sociétés. Il en est de même pour les simulations paléoclimatiques réalisées dans différents projets.

Les demandes s'intensifiant, il est souhaitable de mettre en place un service dédié permettant de répondre aux besoins de la recherche multidisciplinaire concernée pas les résultats des simulations, ouvert à l'international. Un tel service peut se développer suivant le modèle du portail d'impact développé dans le projet IS-ENES, éventuellement en collaboration internationale. Néanmoins comme pour les services climatiques, un e-portail n'est pas suffisant, il faut aussi avoir des relais scientifiques pour guider les utilisateurs

14- <https://www.data-terra.org/actualite/gaia-data-enjeux-science/>

des données, être en mesure de reformuler les demandes pour fournir des données et des indicateurs climatiques appropriés et offrir des formations à l'utilisation des ressources mises à disposition.

B 6.2.3 Une plateforme d'analyse modèles-données

Il est nécessaire de mettre sur pied une plateforme d'analyse modèles données permettant à des personnes ayant des pratiques informatiques diverses d'interagir plus rapidement. Un prototype est en cours de développement à l'IPSL. Un tel service pourrait être accroché au développement de la plateforme nationale d'analyse CLIMERI-France développée autour des simulations de référence du programme mondial de recherche sur le climat et qui devrait s'étoffer avec le PEPR TRACCS¹⁶ et la mise en place de services climatiques. De nombreux besoins se croisent que ce soit sous l'angle des conditions actuelles futures ou passées pour mettre en place des services climatiques

B 6.2.4 Des moyens dédiés à ces services

Des moyens financiers spécifiques devront être engagés pour 1) permettre l'émergence de projets collaboratifs ayant pour but de développer des outils au service de la communauté et 2) développement l'écosystèmes de services et les rendre opérationnels.

Plusieurs possibilités ont été évoquées. La MITI¹⁷ du CNRS pourrait être porteuse de ce type d'appel à propositions pour favoriser l'intégration avec des collègues en sciences des données (CID55) ainsi que des informaticiens des laboratoires et des OSUs. Une autre voie serait la réponse à l'Appel à Projet annuel « Atelier de la données »¹⁸ du MESR pour fédérer la communauté Paléo autour de pratiques communes distribuées sur le territoire. Néanmoins, répondre à ces besoins au travers d'un projet d'envergure permettrait de garantir une véritable coordination nationale répondant aux approches multidisciplinaires des axes scientifiques fédérateurs et porteurs identifiés dans la section B 1.

Une coordination et un accompagnement en ressources humaines sont également nécessaires. Les inventaires conduits au niveau national par les unités de recherche et les OSUs dans la continuité de l'Equipex ClimCor et les efforts de bancarisation des échantillons anciens doivent être soutenus et intensifiés dans le cadre d'un effort coordonné assurant le lien entre données et métadonnées tout au long des cycles de vie des échantillons et de leurs données. L'enjeu est de pour pouvoir favoriser les échanges méthodologies, créer un réseau de curateurs d'échantillons dont l'investissement collectif et l'expertise soient reconnus en

termes de carrière et pouvoir mettre en place une valorisation systématique des données et produits associés. Il est souhaitable d'envisager que des personnels dédiés soient répartis au plus proche des unités de recherche compétentes sur un sujet donné, mais interagissant avec l'ensemble de la communauté.

14- Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques (<https://climeri-france.fr/pepr-traccs/>)

15- Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires

16- <https://recherche.data.gouv.fr/fr/actualite/recherche-data-gouv-lance-son-deuxieme-appel-a-manifestation-dinteret-ateliers-de-la-donnee-presentez-vos-projets>

B7. Consolider la communauté nationale P&P

Ce livre blanc fait apparaître un projet fédérateur multidisciplinaire de grande envergure au niveau national pour lequel il faut renforcer la coordination scientifique et les dynamiques de travail. Ces aspects ont été évoqués à plusieurs reprises. Pour ne pas alourdir un paysage déjà chargé, il faut certainement entrevoir une refonte des circuits d'interactions, assurer des points de rencontres nationaux et articuler les différentes dynamiques de travail.

B 7.1 ANIMATION SCIENTIFIQUE

B 7.1.1 Favoriser l'interdisciplinarité

La nature extrêmement multidisciplinaire et la large gamme de périodes de temps couvertes interrogent sur la façon d'organiser la veille scientifique et les nombreuses discussions à avoir avec l'ensemble des disciplines au cœur des thématiques P&P ou en forte interaction avec ces thématiques. Plusieurs propositions pour favoriser l'interdisciplinarité ont été relevées qui demandent un accompagnement logistique et humain :

- Organiser des workshops par thème/mot-clé, mais sans inclure le mot paleo ni de période clé. Exemple du colloque sur les migrations.
- Créer des espaces (réels ou virtuels) de dialogue interdisciplinaire ou de dialogue science-société comme l'École de Berder ou l'École des Houches.
- Organiser des colloques interdisciplinaires ou écoles thématiques sur les thèmes de l'adaptation, de la résilience, de la gestion des ressources, des migrations, etc. Comment les disciplines abordent ces questions et dans quel cadre concret (GDR, PCR) peuvent dialoguer les communautés ?
- Renforcer le dialogue interdisciplinaire en partageant un vocabulaire ou des objets communs. Par exemple, les niveaux de base ou les états moyens ne sont pas les mêmes pour les paléoenvironnementalistes et pour les archéologues.
- Étendre l'interdisciplinarité : économie, politique, sociologie, ethnologie, sciences du comportement, philosophie pour intégrer pleinement les P&P dans les sciences de la durabilité
- Encourager les archéologues (scientifiques et prescripteurs) à investir les espaces entre les sites archéologiques proprement dits (lieux de parcours, de cueillette, d'aménagements) pour améliorer la continuité (notamment en termes de datation) entre les informations archéologiques et paléoenvironnementales [NB: la loi, en France, rend possible la prescription d'une fouille préventive sur une thématique environnementale]. Renforcer l'accès des paléoenvironnementalistes aux enregistrements

archéologiques: faciliter l'accès et le développement d'études intégrant le prélèvement de bioindicateurs tout en évaluant les gains/risques pour la préservation du patrimoine.

- Rentabiliser l'exploitation interdisciplinaire du matériel existant. Cela suppose d'accepter de travailler sur du matériel pas toujours prélevé de façon idéale ou dans le contexte que l'on aurait choisi.
- Intégrer les données issues de la culture matérielle, de l'archéologie spatiale et des sources historiques: outils agraires, aménagements/abandons de sites liés à des contraintes environnementales, occupation du territoire, données textuelles ou iconographiques sur la description ou l'exploitation des paysages, sur les événements climatiques et leurs conséquences, etc.
- Relever les nombreux défis pour la modélisation des paléoclimats et des paléoenvironnements demandera des collaborations plus étroites entre les différents types de modèles ainsi que la mise en place d'un réseau d'expertise pour une diffusion des nouvelles méthodologies.
- Il faudra également veiller à la bonne intégration entre les priorités paleo et celles des autres équipes de modélisation ou d'analyse (climat ou environnement actuel, futur) pour éviter les duplications méthodologiques et logicielles et permettre un renforcement des synergies entre les études pré-quaternaire, quaternaire, climat et environnement récent et actuel, évolution future.

B 7.1.2 Visibilité et communication nationales

Plusieurs interrogations sont aussi apparues sur la façon de mieux partager les informations, naviguer dans la complexité du national et renforcer les collaborations, tout en évitant de se disperser dans de trop nombreux projets ou cercles d'interaction. Plusieurs initiatives sont plébiscitées et demandent à être pérennisées comme :

- Soutenir la Lettre Paléo,
- Développer Climat-Impacts ou le GDR Climat Vie Environnement pour décroïsonner, notamment sur le caractère interdisciplinaire tout en conservant la diversité des conférences et les opportunités de rencontres permises, entre autres, par les sociétés savantes,
- Pérenniser l'École d'été CNRS transdisciplinaire Paleo (organisée pour la 1ère fois en 2022 à Agincourt).

Pour garantir une visibilité interne et externe des activités, il est souhaitable de disposer d'un portail web dédié et maintenu dans la durée est souhaité. Un tel portail devrait permettre de rassembler les actualités de la communauté, dont offres d'emploi, congrès, résultats majeurs, un espace de médiation (grand public, journalistes, décideurs, entre-

prises) des contenus pédagogiques partagés, un registre des sociétés savantes, un registre des métiers (à destination des élèves/étudiants), un annuaire des experts.

La notion de lieu iconique ou maison des P&P est revenue à plusieurs reprises et répondrait aux aspirations de visibilité, d'accompagnement des activités et des services. La/les personne(s) en charge de l'animation de ce lieu pourrait animer le portail/services paléo et aider à créer des espaces (réels ou virtuels) de dialogue inter-échelles temporelles et spatiales et de confrontation des résultats (tels que ceux issus des comparaisons données/modèles).

B 7.1.3 Visibilité internationale

Les recherches et les prospectives se placent dans un cadre international que ce soit pour les interactions scientifiques ou l'accès aux terrains. De nombreux travaux ne peuvent pas être menés à l'échelle d'une nation, ce qui demande aussi de regrouper les efforts avec différents partenaires. La visibilité à l'international doit cependant être maintenue et renforcée. Plusieurs leaderships internationaux assurent également un phasage des agendas scientifiques entre les agences de financement et une visibilité accrue des recherches.

Il est ainsi important de disposer des leviers permettant d'encourager la communauté P&P à porter des projets internationaux, à investir les espaces de discussions ou de coordination et de relayer les activités internationales au niveau national. Deux éléments ont été suggérés dans les différentes consultations. Ils, et concernent l'accompagnement financier et une meilleure reconnaissance de ce type d'activité, qui ne soit pas que d'ordre individuelle.

B 7.2 QUELQUES LEVIERS D'ACTION POUR OPTIMISER LES FINANCEMENTS ET LES RESSOURCES HUMAINES

L'état des lieux fait ressortir que la multitude de structures tend à cloisonner la communauté, même si chacun n'interagit pas avec toutes les structures (section 4). Une animation nationale renforcée est indispensable pour développer et animer des grands chantiers scientifiques, ou favoriser les contributions à des projets de recherche. Elle doit de plus pouvoir s'appuyer sur un programme national d'envergure permettant d'assurer le financement des activités, l'organisation logistique et garantir une masse critique de chercheurs ayant des compétences en différents domaines.

Plusieurs cloisonnements et éparpillements de la communauté ont été identifiés. Certains découpages pouvant nuire à la lisibilité des activités de recherche, ou isoler les communautés P&P ont été mentionnés lors des consultations. À titre d'exemple : la cryosphère, le littoral ou l'étude des (paléo)-écosystèmes sont des sujets de recherche écartelés entre les domaines OA, TS et SIC, ou entre l'INSU, l'INEE et

l'INSHS. Alors que le nombre de structures administratives a fortement augmenté depuis 20 ans, le temps disponible est resté le même, et devient la ressource la plus rare pour les chercheurs. Même s'il est nécessaire de respecter la diversité et l'identité des différentes communautés scientifiques, une réflexion approfondie sur la structuration des P&P entre les domaines de l'INSU (OA, TS, SIC), et entre instituts du CNRS (INEE, INSU, INSHS) est nécessaire.

Par ailleurs, les lois de décentralisation et l'autonomie des universités (LRU) ont depuis 10 ans engendré une création nette de structures administratives locales, la gestion et l'animation de ces nouvelles entités venant s'ajouter à des calendriers déjà saturés. Même si la décentralisation et la création inhérentes de structures locales de tailles intermédiaires (OSUs, IDEX, LABEX) a créé des synergies et pour certains chercheurs un sentiment de reprise de contrôle sur la gouvernance de leurs activités, il est utile de s'interroger sur l'impact que ces mutations ont eu sur la communauté nationale P&P et sa capacité à construire et faire vivre des grands projets nationaux fédérateurs.

Une simplification serait bénéfique à l'activité de recherche en P&P, tant aux échelles nationales que locales. Comme certaines des structures émanent des organismes (*top down*) et d'autres des communautés (*bottom up*), cet agenda est politiquement compliqué et ne fait pas l'unanimité; même si tous les chercheurs sont d'accord pour pointer un excès de structuration administrative, il n'y a pas d'accord pour savoir quelle structure supprimer en priorité. Les besoins énoncés autour de la collecte et la gestion des échantillons, les bases de données et les services doivent pouvoir être couverts sans que la communauté P&P ait à s'éparpiller dans de nombreuses structures au risque de perdre sa cohérence. Il est souhaitable d'approfondir la réflexion entre les organismes et administrations concernés pour revoir la structuration des activités P&P de façon à en augmenter la visibilité, fluidifier les démarches et optimiser l'accès aux moyens financiers et humains.

Plusieurs solutions de court et moyen termes ont été proposées au cours des consultations et sont reportées ici :

- Veiller à synchroniser le calendrier et le lieu des différentes prospectives et harmoniser leurs organisations au sein des instituts et entre les instituts du CNRS sur les thématiques conjointes pour traiter les thématiques P&P de façon globale; cela permettra des réunions communes (unité de lieu et de temps), afin que les chercheurs travaillant dans plusieurs domaines puissent participer et contribuer à des discussions fécondes;
- Simplifier les statuts des outils du CNRS, en regroupant les SNO / OHM / ZA lorsque c'est possible
- Supprimer les cloisonnements thématiques basés sur les échelles de temps dans les sections du CNRS, et du CNU ou les domaines.
- Enfin, l'accès aux publications est différent selon l'INSU, l'INEE, etc., ce qui ne favorise pas l'interdisciplinarité et

questionne la pertinence de la création d'un portail commun P&P inter-institut.

Une autre interrogation a porté sur la définition même de la communauté et de l'activité P&P : doit-elle se regrouper en tant que communauté, en faisant émerger ses questions scientifiques spécifiques, au risque de s'isoler d'autres disciplines ? ou au contraire doit-elle conserver son apparente dispersion pour continuer à s'ouvrir et à vivre au sein de différents écosystèmes de recherche ? Ces questions – non tranchées – ont des répercussions sur de nombreux aspects, notamment les financements et les ressources humaines : faut-il demander des AO et des sections/CID CNRS consacrés uniquement aux P&P ou considérer que les P&P nourrissent des questions qui alimentent à leur tour de nombreuses disciplines ?

Le fait qu'il existe différentes sections du CNRS recrutant des chercheurs estampillés « P&P » au sens large (18, 19, 30, 52) a été discuté pendant les prospectives de ce livre blanc et les conclusions sont plutôt en faveur d'un *statu quo* sur ce point précis. Si la dispersion dans différentes sections peut engendrer un certain cloisonnement thématique qui limite les interactions entre communautés, elle permet aussi des recrutements plus diversifiés que s'il n'existait qu'une seule section P&P au CNRS. Même si la création d'une section CNRS purement P&P peut être une piste à creuser, la diversité de nos métiers et leurs multidisciplinarités pourra continuer à assurer sa large diversité thématique et méthodologique avec l'existence des différentes sections historiques (18, 19, 30, 31). Cette réflexion est transférable en partie pour les sections du CNU.

Le comité a aussi conclu qu'il était important de veiller au renouvellement des recrutements dans les disciplines naturalistes fondamentales (paléontologie, palynologie), en veillant au maintien des compétences indispensables aux découvertes scientifiques. En particulier, l'équilibre entre chercheurs/fonctions supports est un point de vigilance. Par ailleurs il faudra aussi veiller au recrutement de jeunes chercheurs sur les nouvelles compétences émergentes dans les domaines clefs à fort potentiel de rupture (*big data*, modélisation, IA, géochimie, géophysique).

B 7.3 ÉVOLUTIONS DES MÉTIERS ET BESOINS EN FORMATIONS

Les P&P sont confrontés aux objectifs contradictoires de maintien des bases scientifiques et méthodologiques et de révolution des idées et des techniques. La section 4 et les éléments de prospective font état de la diversité des approches et de quelques points de vigilance pour les années à venir en termes de compétences et de renouvellement des ressources humaines. Un enjeu pour les prochaines années est à la fois de préparer le vivier à même de s'investir dans les recherches P&P et de permettre une évolution des métiers actuels vis à vis des nouvelles technologies et la science des données, tout en gardant un ancrage fort dans

les disciplines sur lesquelles s'appuient le socle de connaissance P&P. Cela concerne la formation de base et la formation continue. Des offres de formation pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens devront être imaginées pour les aider à exploiter au maximum ces nouveaux outils, et également les confrontations et intégrations modèles données.

B 7.3.1 Formation de base

Les formations qui proposent un socle de connaissances en lien (de près ou de loin) avec les P&P, sont destinées avant tout à former des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens qui rejoindront les différents laboratoires. Cependant, ces cursus ont aussi un rôle primordial pour former une part importante de la société, actrice de l'atténuation et des adaptations aux risques environnementaux et climatiques auxquelles elle est (ou sera) confrontée. Plus largement, ces formations doivent apporter le niveau de connaissance pour remplir les objectifs du développement durable à tous niveaux de la société (secteurs d'activités publics ou privés, collectivités, politiques) par une meilleure connaissance du fonctionnement des socio-écosystèmes. De nouvelles propositions d'enseignements, dès les premiers degrés de l'université (licence) jusqu'aux masters, doivent intégrer les enseignements de base, comme « la fresque du climat », « ma Terre en 180 minutes », « Inventons nos vies bas-carbone », et toutes les formations dédiées aux calculs d'empreinte climatique ou de communication autour des rapports du GIEC.

L'objectif est ambitieux, car l'enjeu pour les années à venir est de disposer non seulement d'une offre de formation très diversifiée et pluridisciplinaire (géosciences, sciences naturalistes, physiques ou chimiques), mais également qui s'appuie sur des spécialités nécessitant un approfondissement très spécifique (botanique, taxonomie, micro-paléontologie, géologie et approche de terrain, géochimie isotopique, programmation, etc.). Comment concilier alors la préservation des socles avec les spécialisations, voire l'apparition de nouvelles disciplines, telles que les « *data scientists* » exploitant les bases de données ou ceux développant l'Intelligence artificielle ? Cette ambition se confronte également aux rythmes d'apprentissage et d'application très différents entre les disciplines. Un autre développement important est d'élargir les formations faisant le lien entre les communautés des données et celles des développeurs de modèles numériques.

À cette proposition s'adosse la nécessité de renforcer les besoins de formations pour les sciences de la Vie et de la Terre (SVT), les Sciences humaines et sociales (SHS), en plus des disciplines plus traditionnelles pour les P&P. En soit, l'idéal serait d'avoir une formation qui allie un socle scientifique solide et spécifique dans plusieurs disciplines clés, en la complétant par une approche pluridisciplinaire et ouverte à l'enseignement de nouveaux domaines. Un volet supplémentaire important est d'élargir et de renforcer la part des

paléosciences dans les formations à visée plus actualistes (écologie, agronomie, géographie, anthropologie, climatologie, océanographie, géosciences) car le recul du temps long dans la définition des trajectoires actuelles (dans un système déjà anthropisé) et futures est encore très peu pris en compte, alors qu'il est seul garant d'une connaissance des niveaux de base pré-anthropiques. Mieux former à la notion « d'héritage » et d'états initiaux, en renforçant les connaissances rétrospectives, est donc une nécessité.

B 7.3.2 Nouvelles offres de formations / formation continue

Si les formations de base en lien avec les P&P sont majoritairement proposées au sein de cursus universitaire, il est important d'ouvrir ces formations au monde professionnel non académique. Le développement déjà engagé vers les formations continues peut permettre à différentes professions de développer une vision holistique des enjeux environnementaux actuels nécessaires à la formation de la nouvelle génération d'acteurs sociétaux scientifiquement éclairés sur ces thématiques (voir section B 9).

De même, le développement et l'appropriation de nouvelles pratiques utilisées chez les industriels, afin de familiariser les futurs acteurs aux fonctionnements et pratiques en laboratoire (e.g. Fablab), est un outil innovant et prometteur, à intégrer dans les différents cursus. Ces expériences sont déjà en cours de développement dans certaines formations¹.

B 7.3.3 Enjeux de formation vis à vis de la communication, vulgarisation et médiation scientifique

Les chercheurs ne sont pas toujours formés à la communication du changement climatique et environnemental auprès du grand public. En effet, le sujet est particulièrement difficile parce que politiquement chargé. Des formations et *media training* se sont développés et devraient être plus largement accessibles.

Au vu de la problématique prégnante du réchauffement climatique, les enseignements universitaires se diversifient en licence et en master. De nouvelles offres de formation, utilisant des méthodes pionnières, font leur apparition de façon ponctuelle et non-organisée au niveau national. Ces formations visent à répondre aux attentes de la société en apportant les connaissances et les méthodologies pour aborder le large éventail de questions associées au changements globaux et interagir avec différents porteurs d'enjeux. Il s'agira de faire en sorte que ces offres de formations ponctuelles et non-organisées deviennent pérennes et organisées au niveau national.

B8. Science et société

B 8.1 DIFFUSION DES CONNAISSANCES VERS LE GRAND PUBLIC – MÉDIATION ET VULGARISATION

Au-delà du GIEC et de l'IPBES, et malgré quelques documentaires diffusés à des heures de grande écoute ou dans des revues grand public, la communauté P&P considère que ses résultats pénètrent peu la société. Pourtant, les sujets P&P sont susceptibles de faire rêver. Mais le ressenti est que l'angle souvent catastrophiste des résultats P&P (les glaciers fondent, les pluies diluviennes s'abattent, etc.) lui confère bien souvent une dimension de science-fiction et prend le pas sur la réalité des métiers et des résultats. Les changements climatiques et environnementaux impriment des traces dans les mémoires immédiates des populations qui les ont subis, mais peuvent parfois s'effacer de cette mémoire collective s'ils ne font pas l'objet de traces (mémoire sélective à long terme). Il s'agit de repenser le narratif du changement.

Ce constat s'inscrit dans un contexte global d'une perte de confiance dans la science, d'une méconnaissance des objectifs du travail de recherche (considéré comme devant apporter des solutions à la société – voir sondage Harris récent commandé par le CNRS), mais aussi éco-anxiété. Par ailleurs les P&P sont, par essence, des sciences de la complexité, par nature difficiles à transmettre (à la fois vers le grand public, vers les décideurs et opérationnels, mais aussi en interdisciplinarité). Par exemple, les incertitudes associées aux travaux P&P sont parfois interprétées comme un défaut de sérieux. Il s'agit d'éducation à la science et à la complexité des phénomènes qui est un souci, en général, dans la relation au grand public.

La communauté P&P doit persévérer dans les efforts de diffusion des connaissances vers un public très large pour 4 raisons majeures: (1) développer la visibilité, la lisibilité et l'attractivité pour assurer des cohortes garantissant des flux suffisants en formation et en recrutement; (2) les sciences P&P constituent un excellent vecteur pour promouvoir la méthode scientifique et l'esprit critique; (3) renforcer les liens avec les décideurs et opérationnels; (4) nouer de nouvelles interactions interdisciplinaires, source d'innovation.

Pour parvenir à ces objectifs, il semble essentiel que la communauté fasse rêver. Non seulement par le prisme des questions qu'elle soulève ou des connaissances qu'elle construit, mais également en proposant une lecture moins austère de nos métiers, par exemple en insistant davantage sur les missions de terrain, les méthodes de travail, et l'instrumentation analytique. Ainsi, le grand public et les étudiants pourraient mesurer toute la richesse des activités P&P.

Une solution pour faire rêver serait de davantage s'appuyer sur les images et plus généralement de faire appel aux sens, en collaboration avec des artistes ou en s'appuyant sur l'art et les représentations des changements passés (dont art pariétal, par exemple), en collaboration avec des ethnologues. Les P&P peuvent aussi être amenées sous l'angle de voyages dans le temps avec des systèmes de visualisation globaux et interactifs dans l'esprit de Climate-archive (développer une version française, contribuer à la version existante, la traduire?) ou des services proposés au sein de EarthCube. Cela constituerait le volet pédagogique des services P&P proposés dans le chapitre B 2.4.

En plus d'informer sur les changements globaux et à grand échelle, la vulgarisation des travaux P&P doit s'appuyer sur davantage de concret, de quotidien, de proximité, avec des messages plus directs, perceptibles et accessibles. Il est nécessaire d'affirmer que les conditions actuelles résultent d'un long héritage, de durées des processus plutôt que de focaliser sur les événements, de pointer les cercles vertueux (sol-climat-biosphère) et d'insister sur les liens passés entre l'évolution des conditions environnementales et celle des sociétés. La régionalisation des reconstructions pourrait également faciliter le dialogue entre P&P et société par davantage de proximité.

Une plus forte présence des membres de la communauté P&P dans les médias et sur les réseaux sociaux et des interactions avec les vulgarisateurs/influenceurs permettraient aussi une plus large diffusion des concepts et résultats des P&P, tout comme l'intégration des concepts de base dans les formations de journalisme, comme c'est désormais le cas pour le changement climatique. Pour que davantage de membres de la communauté P&P s'investissent pleinement dans ces tâches de diffusion, il apparaît essentiel qu'elles soient reconnues à leur juste valeur lors des évaluations.

B 8.2 DES EXPERTISES AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

Les recherches P&P ont le potentiel d'amener une aide à la décision sur le climat, la biodiversité et l'évolution des organismes, les ressources, les aléas, l'évolution des sociétés anciennes et des milieux. Les résultats et l'implication des experts dans les rapports du GIEC et de l'IPBES est une façon de s'impliquer sans changer de métier dans l'interface science-politique. Il est souhaitable que les résultats acquis puissent être mieux intégrés à ce rapport. En particulier les prospectives sur les questionnements régionaux, les intégrations climat-environnement-biodiversité-sociétés à ces échelles apportent des éclairages indispensables aux questions actuelles. De nombreuses réticences à s'engager

dans ces rapports sont à surmonter, ce qui demande de mettre en place des espaces de discussions, de s'interroger sur la science manquante dans les rapports actuels et la façon dont les activités P&P participent à l'élaboration des nouveaux concepts et font progresser les connaissances relayées dans ces rapports. Un accompagnement est également nécessaire au niveau des laboratoires ou des institutions pour favoriser l'implication et les processus de relecture.

D'autres aspects sont à considérer dans l'interface science-société. La connaissance de l'histoire des milieux permet, par exemple, d'envisager des solutions de restauration dans des problématiques de conservation (voir paragraphe B 1.3.5). Ces capacités ne semblent pas suffisamment ruiseler sur des questions opérationnelles. L'effort à réaliser peut paraître chronophage pour une communauté déjà très investie sur ses missions premières. Il suppose par ailleurs des adaptations du langage (jargon) et l'explicitation répétée des concepts pour ancrer les enjeux actuels dans une histoire ancienne. Là aussi faire tomber les autocensures et accompagner ces interactions est nécessaire pour les rendre plus naturelles.

La création des observatoires régionaux a permis, dans une certaine mesure, de faire le lien entre certaines thématiques climatiques et environnementales aux échelles locales et les recherches en P&P. Le rapprochement entre les recherches en P&P et en climats et environnements actuels à ces échelles est particulièrement pertinent dans le cadre des travaux des Groupements régionaux d'experts sur le climat (GRECs). Ces travaux centralisent, transcrivent et partagent la connaissance scientifique sur tous les aspects du changement climatique pour guider les politiques territoriales et informer la société civile au plus proche de ses interrogations. Dans certains cas, ces initiatives trouvent un écho plus large lorsque les échelles spatiales sont pertinentes (e.g. les rapports d'experts du climat à l'échelle du bassin méditerranéen MedEC). Rester vigilants sur la composition des comités ou groupes de travail et renforcer les intégrations passé/présent/futur dans les réflexions de ces groupes permettra de mieux prendre en compte l'apport des thématiques P&P sur les différents sujets.

Une aide à la décision auprès de différents services, opérateurs ou ONG est aussi apportée par les P&P au travers de quelques actions. Les sujets concernent la biodiversité et l'évolution des organismes, les ressources (services écosystémiques, services rendus par les sols - séquestration du carbone, ressource en eau, ressources fossiles - uranium/pétrole, gaz, charbon, granulats, pierres...), les aléas (érosion, inondations, tempêtes, extrêmes climatiques, transferts sédimentaires, pollution), les évolutions des sociétés anciennes, les propositions de solutions de restauration grâce à l'histoire des milieux dans des problématiques de conservation (états de référence, trajectoires des écosystèmes, etc.).

Quelques propositions ont émergé des consultations pour améliorer le transfert de connaissances ou d'approches vers les décideurs et opérationnels en multipliant les occasions d'interactions. Ces tâches pourraient s'appuyer sur des structures de transfert de ces connaissances, des GRECs ou d'interfaces variées (Pôles de compétitivité, SATT). En particulier :

- Renforcer la formation des décideurs et opérateurs sur les questions P&P. Par exemple, pour les élus, dans l'esprit de ce qu'ont entrepris les membres français du GIEC lors de la prise de fonction des nouveaux députés en 2022.
- Motiver les membres de la communauté P&P à intégrer les structures de décision, d'opération et/ou de conseils. Organismes consulaires (Chambres de commerces, chambres d'agriculture), services décentralisés de l'état (DREAL, DRAC/SRA), conservateurs, personnels des instituts français à l'étranger, opérateurs (archéologues de terrain), ONGs.
- Travailler avec les décideurs en amont des projets dans une optique de co-construction, que ces projets relèvent du fondamental ou de l'opérationnel.
- Renforcer la formation professionnelle pour préparer la prochaine génération de gestionnaires (insertion des jeunes dans des structures telles que l'ONF, les syndicats de rivière, etc.) et de les informer de la pertinence des P&P dans leur approche de terrain et la compréhension des trajectoires (prise de recul, résilience) des écosystèmes dont ils sont en charge.
- Renforcer la formation des étudiants en archéologie aux approches paléoenvironnementales (formation de base, continue, écoles thématiques).
- Considérer ces structures comme des débouchés potentiels pour les étudiants formés en P&P. Ils constitueront des relais efficaces d'information ou de réseautage.

Dans son organisation, la communauté P&P doit également porter une attention particulière à rendre visibles et intelligibles les produits de sa recherche :

- L'intégration multidisciplinaire à l'échelle régionale (multiplier les études à l'échelle locale et développer de véritables approches interdisciplinaires INSU, INEE et INSHS) ; s'appuyer sur des connaissances locales, profiter des efforts de régionalisation pour davantage de proximité à l'échelle du territoire.
- Sélectionner et rendre plus visibles les données quantitatives (climat, vulnérabilité des écosystèmes, etc.) dont ont besoin les « aménageurs ». Cela suppose des passerelles de discussions avec ces structures et de se doter des moyens de fournir un certain nombre de services (section B 6.2).
- S'appuyer sur des connaissances locales et profiter des efforts de régionalisation consentis par la communauté (section B 2.3) pour davantage de proximité à l'échelle du territoire.
- Organiser le transfert de connaissances vers les décideurs : organiser des sessions scientifiques dans les conférences proposant des tables rondes avec les acteurs du développement durable.

CONCLUSION

Ce livre blanc confirme les forces de la communauté P&P en France et les grandes avancées réalisées depuis le rapport de prospective de Garchy en 1998. Les différentes consultations et les analyses du comité livre blanc ont à la fois fait ressortir dans la section A (état des lieux) le fort potentiel, mais aussi quelques vulnérabilités et points de vigilances pour maintenir une activité au plus haut niveau international.

Les recherches P&P bénéficient de nombreuses interactions entre les laboratoires, d'un fort dynamisme des équipes, d'une production soutenue et d'une forte implication internationale. Les questionnements sont sans cesse renouvelés. Les activités sont très dépendantes des grands moyens de types infrastructure de recherche nationales et internationales, ainsi que des moyens analytiques demandant une instrumentation de pointe. Elles sont fortement multidisciplinaires et, de ce fait, doivent constamment trouver un équilibre entre l'évolution propre des disciplines et les intégrations multidisciplinaires. De nombreuses interrogations sont soulevées sur la pertinence de la structuration actuelle et le poids des silos disciplinaires intervenant soit sous la forme d'échelles temporelles (ex : pré-quaternaire/quaternaire ou paléo/période récente) soit dans les organigrammes fonctionnels des organismes de recherches ou des universités. Les sources de financements sont très diversifiées et conduisent actuellement à des risques de financement en accordéon et d'éparpillement mettant à mal la structuration nationale fédératrice existante. Le potentiel des recherches P&P vis-à-vis des questions sociétales n'est pas exploité à la hauteur ou il pourrait l'être.

Le livre blanc s'attache aussi à mettre en avant les bifurcations engagées, à partir desquelles se dessinent les grandes questions qui justifieront des nouvelles structurations et de nouveaux moyens pour les 10, 20, 25 ans à venir. Les propositions émanent de la communauté. Elles font ressortir un paysage scientifique, méthodologique et technique en mutation et la volonté de renforcer la cohérence des activités P&P en France tout en gardant une forte capacité d'innovation et des fondements disciplinaires au plus haut niveau. Quatre actions nationales fédératrices autour desquelles se déclinent les grands défis des prochaines années ont été identifiées :

- Un projet (ou programme) scientifique multidisciplinaire d'envergure faisant écho, sous l'angle des P&P, aux grands défis sociétaux liés à l'atténuation du changement climatique, la perte de la biodiversité, l'adaptation et les objectifs du développement durable, ainsi que différents facteurs de risque environnementaux.
- Un conservatoire national permettant la conservation et la systématisation du référencement des échantillons, de façon à valoriser les campagnes de terrain, renforcer les approches multidisciplinaires, garder les savoir-faire et pouvoir revisiter des données anciennes avec de nouvelles questions et méthodologies.
- Le développement et l'interopérabilité de bases de données ouvertes adaptées aux questions P&P et la mise en place d'une structuration permettant de renforcer la dynamique autour des comparaisons et intégrations modèles-données.
- Le développement de services multidisciplinaires pour diffuser les savoir-faire, les données et logiciels d'analyse et pour se doter d'interfaces permettant de renforcer les liens avec la société au travers d'actions de médiation scientifique ou de différents niveaux d'expertises.

Le livre blanc décline également plusieurs propositions pour mettre en adéquation la structuration de la communauté, son animation, ses financements et les ressources humaines avec les grandes directions souhaitées pour les années à venir. Ces éléments demandent à être approfondis mais donnent des bases pour déployer plus avant les différentes propositions et orientations rassemblées dans le livre blanc.

Un élan a été donné avec l'élaboration de ce livre blanc. Il est important de le maintenir par un accompagnement financier et humain adéquat, et de s'assurer que les directions proposées jouent leur rôle de catalyseur pour bénéficier au mieux des forces et de l'originalité des recherches menées dans les laboratoires en France.

BIBLIOGRAPHIE

Le corpus bibliographique extrait de la base WoS contient les références de près de 8900 articles sur la période 2000-2020. Plutôt que mettre une section « bibliographie » dans ce livre blanc et ne devoir retenir qu'une partie du corpus pour garder une taille raisonnable, nous préférons donner les outils nécessaires aux lecteurs pour extraire et exploiter cette base bibliographique. A cet effet, l'INIST a mis en place un site dédié contenant des outils de visualisation et d'extraction des données : <https://paleoclimatenvironnementfr-20002020v1.dboard.inist.fr/>.

Depuis la page d'accueil, le corpus complet des 8900 références peut être téléchargé en suivant les liens « voir plus » puis « méthodologie » qui donne accès, en bas de page, à l'extraction d'un fichier .csv.

Il est également possible de ne télécharger que des extraits du corpus initial, ceux-ci étant soit prédéfinis soit déterminés par l'utilisateur. Pour ce type d'extraction sélective, il faut passer par les graphiques de visualisation sur la page d'accueil. Ceux-ci peuvent être exploités tels quels ou peuvent être modifiés (icône « voir les détails ») en introduisant des termes de recherche dans la zone de dialogue au-dessus du graphique, et/ou en (des)-activant des filtres préétablis, situés à la gauche du graphique (e.g. année, sites géographiques, mots-clés, organismes de recherches-tutelles, unités de recherche...). Une fois le corpus bibliographique réduit, il est possible de voir les références extraites en cliquant sur l'icône « suite » (= trois points) située en haut, à droite du graphique. Sur la page qui s'ouvre, on peut venir télécharger le tableau au format .csv en activant l'icône flèche située en haut et à droite.

Parmi les types d'extractions possibles, on peut, par exemple, comptabiliser les publications par champ thématique ou par périodes de temps géologique, analyser l'évolution des collaborations étrangères par pays ou par laboratoires, etc. En se basant sur l'association de mots clés, il est également possible de faire des analyses d'ordre supérieur telles que mettre en évidence les interactions plus ou moins fortes entre les champs de recherche, suivre l'évolution au cours du temps de certaines thématiques et la montée en puissance des thématiques émergentes. Plusieurs exemples d'exploitation de la base bibliométrique ont été présentés dans la partie Bilan.

Les outils de visualisation des données sont relativement intuitifs mais au besoin un module d'aide est disponible depuis la page d'accueil (> « voir plus » > « aide »).



Annexes

Tableaux de synthèse des réunions régionales

TABLEAU 1 :

Synthèse des premières réunions régionales : tour d'horizon à partir des premiers constats du comité livre blanc P&P

RUBRIQUE	CONSTAT
Réflexions générales et question d'identité	
La communauté se pose des questions d'identité sous trois angles différents qui font référence à l'identité d'une communauté paleo vis-à-vis de l'extérieur, à ce que l'on entend comme limites temporelles (depuis quand) et types d'activités sous les mots paleoclimat et paleoenvironnement et aux questions d'identité interne entre les mots paleoclimat et paleoenvironnement.	
Objectifs ou types de questions scientifiques	
Thématiques : quelques enjeux	Quelques grands enjeux thématiques sont apparus, en soulignant l'important de l'approche fondamentale pour l'amélioration de connaissances. Ils concernent le cocktail de forçages à prendre en compte pour étudier la réponse climat/environnement à multi-échelles (avec un accent plus fort sur les processus de petite échelle et paléo-précipitations) ; le besoin de replacer les écosystèmes actuels dans une trajectoire et avoir une meilleure prise en compte de la dynamique de la biodiversité ; le renforcement d'études d'événements particuliers (ex extrêmes, instabilité calotte, événement hyperthermaux, relargage de clathrates), mais en gardant aussi une forte dynamique sur les autres aspects ou types d'événements.
« Observations »	La notion de retro-observations ou de retro-observatoires est mentionnée, incluant les questions fondamentales sur l'archivage du signal, sa significativité et une meilleure qualification des incertitudes, ainsi que la place des réseaux Sentinelles dans l'étude des trajectoires de différents environnements naturels et le couplage entre les observations et retro-observations.
Aspects multi et interdisciplinaires	Il est relevé que l'approche interdisciplinaire est inhérente aux thématiques climat ou environnement, et que les nouvelles orientations demandent de renforcer les interactions permettant de mieux prendre en compte l'écologie, les sciences humaines et sociales, et la biodiversité.
Apport passé / futur	Des Interrogations portent sur la façon de mieux aborder les liens entre le passé et le futur et de mieux caractériser les incertitudes des projections climatiques.
Méthodologie	Il y a un accent sur de nouvelles méthodologies, que ce soit pour le développement de nouveaux proxys, de méthodes d'analyses, ou d'approches multidisciplinaires à l'échelle régionale, avec cependant des alertes sur l'équilibre à garder entre les nouvelles approches et l'utilisation de l'existant pour progresser sur les questions de changements de climat ou d'environnement. Les évolutions autour du « big data », de la modélisation et du calcul sont des sujets de préoccupation.
Lien entre communautés ou types d'approches, animation	
Quelques initiatives d'animation ou de coordination ont été mentionnées, et font ressortir un besoin d'animation ou d'appel d'offres dédiés pour la communauté. Il s'agit en particulier de la lettre Paléo éditée par Guillaume Paris, du GDR Climat-Environnement-Vie du Pré quaternaire qui essaye de structurer la communauté avec une approche modèles-données autour de questions scientifiques et du programme ECLIPSE qui a duré 8 ans avec et favorisé des projets pluridisciplinaires avec un financement adapté.	
Infrastructure, bases de données	
Les discussions montrent les gros enjeux autour des bases de données, leur interopérabilité vis à vis de la complexité et diversité des archives paleo et mentionnent des besoins spécifiques pour les thématiques paleo (ex carothèque, instrumentation pour la datation Ur/Pb par la méthode Ca-ID-Tims, OSL / ESR)	
Financement : questionnements et suggestions	
Quelques aspects soulevés	Les collègues présents soulignent l'importance des constantes de temps longues pour les développements et les analyses liées aux activités paleo, la nécessité de disposer de projets dans le long terme pour le maintien de l'acquisition, de la pérennisation et du partage des données. Certains proposent d'associer en amont le financement de la science comme un complément indispensable à l'accès aux infrastructures (flotte, instrumentation nationale de carottage, plateformes, campagne IPEV, IODP, ICDP etc.). Un enjeu est également de rendre plus efficace le portage de projets pour infrastructures internationales (ICDP-IODP). Enfin, il y a un constat de lassitude face au montage de nombreux projets.
Des guichets dédiés	Plusieurs interrogations ont été formulées sur les questionnements sur la place des activités paleo dans les différents appels d'offres (nationaux, EU etc.). Les différentes réunions régionales se font échos de proposition d'avoir des appels dédiés (tous types d'appels d'offres), mais certains s'interrogent sur la valeur ajoutée et au risque de ne plus accéder aux autres appels. Les financements hors académiques sont mentionnés, ainsi que des questionnements pour l'éligibilité de nombreuses activités paleo. Des appels spécifiques dédiés sur les « échantillons oubliés ou dormants » sont souhaitables, suivant l'exemple d'autres pays qui en ont mis en place.

...

...	
International	
Le principal constat est que la communauté française est très active mais devrait être plus présente dans plusieurs instances (ex IINQUA) ou pour le portage de projets.	
Communication/vulgarisation/formation	
Plusieurs interventions mentionnent l'Intérêt qu'il y aurait à plus sensibiliser les étudiants à la diversité et la richesse des études paléo, en particulier <i>via</i> des cours dédiés dans le cursus. L'apprentissage à l'interdisciplinarité devrait aussi être mis en avant. Proposer des contenus pour les étudiants en médiation culturelle est vu comme une façon de faire mieux connaître les disciplines et les résultats. Avoir des actions ou travailler plus en prise avec décideurs, secteurs activités, etc., a aussi été mentionné.	
Cloisonnement, blocages relevés	
Identité	Les questions d'identité peuvent provenir de cloisonnements entre INSU et INEE et levant des interrogations sur les périmètres de certaines activités paléo, du sentiment de dilution des thématiques dans certains gros labos ou d'appels d'offres ne visant que des approches multidisciplinaires, ou plus simplement de différences entre les approches pour un sujet conjoint ou entre communautés (ex modèles, données, échelles de temps, méthodes).
Organisation/ Financement	Il y a une mise en exergues de silos provenant des appels offres, ou de la place du paléo dans différentes sections du CNRS. Des questions ont été soulevées sur l'intérêt d'avoir une section interdisciplinaire paléo ou des financements dédiés. Il y a des craintes de perte de potentiels avec certains départs à la retraite.
Échelles de temps et d'espace	Il y a une forte aspiration à décroisonner les échelles de temps pre-quaternaire/quaternaire, Paleo/actuel, paleo/derniers millénaires, les échelles d'espace entre les approches globales, régionales et locales. Il est mentionné que la communauté des archéo n'est pas forcément suffisamment connectée à la communauté paléoclimato et vice versa.

TABLEAU 2 :
Synthèse des 2^{es} réunions régionales : discussion autour des enjeux identifiés dans le questionnaire

RUBRIQUE	CONSTAT, OPPORTUNITÉ, PROPOSITION
Opportunités et enjeux pour les échelles spatio-temporelles et la caractérisation des processus	
Archives	Augmentation des résolutions temporelles à toutes les échelles de temps, mêmes très anciennes. Les nouvelles technologies (sub-centimétriques) appliquées aux archives, ou des archives à fort taux de sédimentation (côtier) permettent d'accéder à des résolutions temporelles inespérées jusque-là. Infra-annuel dans les archives récentes, mais aussi à l'échelle des siècles pour les périodes anciennes ou à l'échelle orbitale (cyclo-stratigraphie) pour des séries très anciennes. Ces améliorations représentent de nouvelles opportunités pour la comparaison modèles/données, la modélisation pourra être autant efficace à ces échelles que ce qui est fait pour le très récent.
Calibration / Compréhension des proxy	ex. des Expéditions Tara : comparer la variabilité globale à l'échelle des processus (calcification à l'échelle saisonnière, micro-analyses) permet de mieux comprendre les proxys. Il faudrait généraliser ces approches pour les autres archives. Mettre en place des calibrations universelles « multi-proxies » prenant en compte les effets vitaux pour chaque « driver climatiques clé ». Ces nouvelles résolutions amènent de nouvelles questions et changent notre vision des climats réputés stables lors de périodes anciennes. Elles posent également de nouvelles questions sur la temporalité de l'archivage des traceurs et proxys (temps de latence, représentativité) qui nécessitent des études multiproxys plus approfondies pour mieux comprendre la signification des traceurs et proxys. Elles participent aussi à l'amélioration du dialogue avec la société puisque les échelles de temps sont plus immédiates/compréhensibles par le grand public. L'approche multiproxy permet d'aller toujours plus loin dans la résolution des paléoenvironnements
Transfert d'échelle	Besoin de distinguer les échelles temporelles (calibrations prenant en compte les variables, les organismes etc.) et leurs transferts à l'échelle spatiale globale ou régionale à partir d'enregistrements locaux. Essayer de s'affranchir des phénomènes locaux en croisant plusieurs séquences.
Spatialisation/ régionalisation des changements climatiques et de leurs impacts	Gros efforts d'accumulation de données fournis par les communautés (indépendamment de la période étudiée) pour spatialiser les changements environnementaux. Exemple du Quaternaire /lien avec archéos qui proposent des reconstructions 3D du paysage qui permettent de décloisonner les communautés et de communiquer plus efficacement avec le grand public. Idem au précambrien (malgré les difficultés des méthodes de datation), grâce à l'accumulation de données, on a désormais la possibilité de faire des interprétations régionales et non plus seulement globales. Ré-exploiter/ré-interpréter les archives existantes (dont carottes marines) pour mieux prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des changements ? Accumuler des données en contexte continental pour documenter cette régionalisation et son évolution.
Datations	La limite principale pour avancer, datations sous-dotées au CNRS alors que c'est la base de la paléo. Datations ciblées pour distinguer fossilisation et altération encore complexe. Verrou sur la durée des événements et processus physiques sous-jacents (ex : impact de Toba, glaciations/déglaciations très anciennes, etc.), mais quasiment impossible à lever en raison de limites technologiques et d'autres aspects (bioturbation, taux de sédimentation, etc.) Les biologistes (horloges moléculaires, phylogénie moléculaire, bactéries à signatures particulières...) et astrophysiciens (calage orbital deeeptime) peuvent aider mais pas révolutionner. Quelle aide peut-on espérer d'autres disciplines pour révolutionner nos datations ? Comment organiser une veille ou tisser des liens ?
Opportunités et enjeux pour les observations	
Notions de « rétro-observatoires »	Le lien passé/présent est important mais nécessite un rapprochement avec les actualistes pour étudier les processus de formation des archives. En parallèle, les prélèvements multiples pour quadriller une zone. Les rétro-observatoires seraient éventuellement à implanter dans les zones proches des observatoires. Elles correspondent au besoin d'avoir des séries longues.
Préexploitation des archives	La réexploitation des archives serait très rentable, mais il y a un besoin de moyens et de volonté pour valoriser l'acquis en évitant de multiplier les initiatives non coordonnées. Il faut donc des moyens récurrents, des conditions/garanties d'archivage long terme, une vraie mission de service public pour sanctuariser nos échantillons (inventaire, archivage, bases de données et interopérabilité, ouverture plus large des labos pour ré-échantillonner). C'est un constat inquiétant et connu depuis longtemps à l'échelle nationale. Bref, un chantier énorme. Se rapprocher du BRGM (stockage à Bure), initiatives nationales inter-établissement. Re-soumission d'un TGIR ? Problèmes des fouilles préventives en archéo qui laissent peu de temps pour sécuriser l'archivage des sites.

...

...

Enjeux, opportunités et verrous pour la modélisation, la simulation, les méthodes statistiques	
Evolution des codes et méthodologies pour les simulations	<i>Difficultés</i> : on atteint un carrefour où la complexification et résolution des modèles est inappropriée pour les données, plus grossières. La question de savoir si les moyens de calculs nécessaires pour mieux comprendre la variabilité climatique localement sera disponible d'ici 10-15 ans est posée. Certains paramètres de la machine climatique (pergélisol, vent, poussières) sont trop complexes, besoin de discuter avec les personnes qui documentent ces processus, mais on ne peut pas tout aborder. <i>Solutions</i> : Développer des approches de descente d'échelle pour modéliser les impacts en croisant de multiples variables et leurs effets sur la biodiv, les cycles biogéo, réservoirs, végétation, cycle hydro... rendront efficaces les comparaisons modèles-données pour répondre à des questions environnementalement pressantes. Ex. du LGM, bien documenté : régionalisation de la plaine européenne pour les paléoenvironnements (approche similaire pour l'océan est plus difficile). Emulateurs statistiques du climat pour les périodes longues et les approches ensemblistes, aide aussi à calibrer les modèles.
Modélisation du « vivant »	PISCES/FORAMCLIM modélisent le lien entre vivant et processus taphonomiques et peuvent identifier des biais dans les proxys. La végétation, par exemple, reste un gros challenge pour la modélisation des écosystèmes. De plus, l'augmentation de la résolution des modèles et de leur complexification induit une perte de lien avec la paléo, qui est nécessairement grossière. Les EMICs sont-ils encore d'actualité ?
Simulations climat/écosystèmes/humains	L'archéologie spatiale est un axe fort mais la jonction modèles écologiques (utilisés pour l'ancien)/modèles de comportement humain/anthropisation/société (modèles agro-pastoraux) est difficile, car les approches sont très différentes.
Assimilation de données	Difficiles pour les proxys complexes à interpréter. Pour le très ancien, on en est loin. Pour le récent, on fait émerger les liens entre variables et proxys à différentes échelles de temps, et aident à comprendre les non-stationarités et la sensibilité climatique. Pour les pluies, les paramétrisations des modèles pour la convection sont à améliorer avec les « cloud resolving models ».
Simulations et comparaisons modèles-données	Nouveaux défis associés aux simulations transitoires, comparaisons modèles/données, simulations/assimilation des proxys, descente d'échelle, etc. illustrent la grande dynamique et le potentiel de la modélisation. Les bases de données paléoclimatiques mondiales représentent une grande avancée également. On commence à explorer la variabilité climatique même pour le deep time sans considérer le climat à l'équilibre, on commence à modéliser certains processus environnementaux (recharges/décharges des eaux souterraines, etc.).
Intelligence artificielle/Statistiques	Les objets d'étude (cycle de l'eau, du C, cryosphère etc.) comptent finalement plus que l'aspect « paléo » dans nos métiers, et l'IA permet d'affiner les échelles spatiales. L'aspect quantitatif massif du machine learning permet de travailler à l'échelle de l'individu, d'opérer un pré-tri, et pourrait changer la donne pour les aspects « biodiversité ». Certains développements analytiques (Individual Foraminifera Analysis, XRF) bénéficient du développement de stats et permet de mieux interpréter des données acquises plus anciennement, notamment pour distinguer les signaux climatiques haute fréquence du bruit analytique.
Qui bénéficierait d'un décloisonnement thématique ou des échelles temporelles ?	
Biodiversité	On a besoin de raccorder la paléo-biodiv à l'actuel (données bcp plus étoffées que les fossiles) pour comprendre la réponse de la biodiversité fossile aux perturbations, tenir compte des biais inhérents aux enregistrements fossiles, etc.
Rapports avec les « actualistes »	C'est aussi un pb d'échantillonnage. GEOTRACES a activé des synergies moderne/passé, les actualistes regardant les transferts vers le sédiment sans utiliser les fossiles en tant que proxy. De plus, les questions d'échelles pour les processus actuels se font à des échelles très fines qui contrastent avec nos échantillons très grossiers. La difficulté est de faire accepter que les processus doivent être compris puis simplifiés : jusqu'où peut-on simplifier (par exemple les avancées/reculs des glaciers) sans dire de bêtises ? Le matching actuel/paléo est difficile à cause de cette dichotomie « complexité actuelle »-« simplification des processus pour l'appliquer au paléo ». On pourrait par exemple briser les barrières de vocabulaire. S'interroger également sur le besoin de valoriser des compétences intermédiaires à la frontière entre méthodes actualistes et paléo.
Pertinence de la distinction Quaternaire/deep time	La section 19 a proposé de défaire ce cloisonnement pour se rassembler autour de questions scientifiques, par exemple à travers les trans-échelles passé/présent. L'ANR par exemple a des AO différents selon ces échelles quaternaire/deep time. Plutôt mettre l'accent sur les processus.

...

...

Quels nouveaux enjeux en lien avec les questions de société ?	
Parler au grand public/médias	<p>Au-delà du GIEC et de l'IPBES (l'arbre qui cache la forêt ?) où on utilise bien nos travaux, et malgré des documentaires (archéo/anthropo par exemple) passant à des heures de grande écoute, nos résultats pénètrent peu la société malgré des sujets qui font rêver. On parle en effet souvent de catastrophes (les glaciers fondent, les pluies diluviennes s'abatent, etc.). Nous ne parlons jamais vraiment de nos métiers, et parlons trop de nos incertitudes. Nous devons persévérer, vulgariser, faire rêver pour intéresser les jeunes, qui ne s'imaginent pas que « paléologue » est un vrai métier, les étudiants le comprennent sur le tard !, qui pourtant fait souvent rêver. Parler de nos missions sur le terrain plutôt que comment on obtient les données (pas toujours sexy).</p> <p>Produire des images (rapprochement artistes ?), des reconstructions, des voyages dans le temps, utiliser les rétro-observatoires de zones vulnérables, faire toujours plus de communication et de coupures de presse. Évoquer notre héritage et des synergies créant des cercles vertueux (sol-climat-biosphère).</p> <p>Il s'agit d'éducation à la complexité qui est un souci, en général.</p> <p>La régionalisation des reconstructions (cf. supra) pourrait aider dans le dialogue paléosciences/société par davantage de proximité.</p>
Parler aux décideurs	<p>Nous sommes capables d'amener une aide à la décision sur le climat, la biodiversité et l'évolution des organismes les ressources (services écosystémiques, services rendus par les sols - séquestration du carbone), ressource en eau, ressources fossiles - uranium/pétrole, gaz, charbon, granulats, pierres...), expliquer les aléas (sismique, érosion, inondations, tempêtes, extrêmes climatiques, transferts sédimentaires, pollution), évolutions des sociétés anciennes, proposons des solutions de restauration grâce à l'histoire des milieux dans des problématiques de conservation (états de référence, trajectoires des écosystèmes...). Mais cette capacité est sous-utilisée/ne « ruisselle » (je me fais plaisir !) pour le moment sur des questions opérationnelles.</p> <p>Il faut davantage parler aux décideurs (politiques, services, opérateurs, ONG, etc) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • s'appuyer sur des connaissances locales et profiter des efforts de régionalisation pour davantage de proximité, • travailler avec les décideurs en amont des projets, • organiser des sessions scientifiques dans les conférences ; tables rondes avec les acteurs du développement durable. • Réel effort à fournir de la part de la communauté, notamment en termes d'adaptation du langage (jargon), d'explicitation des concepts et de la nécessité d'ancrer les enjeux actuels dans une histoire ancienne.



Annexes

Acronymes

AAP	Appel À Projets	EAG	European Association of Geochemistry
AFEQ	Association Française pour l'Étude du Quaternaire	EPHE	École Pratique des Hautes Études
AMS	Accelerator Mass Spectrometry	EPIC	Établissement public de caractère industriel et commercial
ANR	Agence Nationale de la Recherche	EPST	Établissement public à caractère scientifique et technologique
AO	Appel d'Offres	ERC	European Research Council
AR	Assessment Report, rapports d'évaluations publiés par le GIEC	ESGF	Earth System Grid Federation
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	ESM	Earth Science Model
C2FN	Centre de Carottage et Forage National (voir F2G)	ESPRI	Mésocentre de l'IPSL pour les sciences du Climat (Ensemble de Services Pour la Recherche à l'IPSL)
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives	F2G	Plateforme Française de Forages Glaciaires
CGF	Green Climate Fund (https://www.greenclimate.fund) fond de financement sous l'égide des Nations Unies dédié aux études sur le changement climatique	FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
CID	Comité Interdisciplinaire (Comité National pour la Recherche Scientifique du CNRS)	FEDER	Fonds européen de développement régional
CLIMERI	Infrastructure nationale de modélisation du système climatique de la Terre	FOF	Flotte océanographique française opérée par l'Ifremer
CMIP	Coupled Model Intercomparaison Project, projet établi pour étudier et comparer les simulations climatiques réalisées à l'aide de GCMs (Global Climatic Models) couplés océan-atmosphère-cryosphère-terre.	FutureEarth	Programme de recherche réunissant les sciences de l'environnement, les sciences sociales et les sciences humaines, l'ingénierie et le droit (https://futureearth.org/)
CNU	Conseil National des Universités	GDRI	Groupe de Recherche International
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	GENCI	Grand Équipement National de Calcul Intensif
CRCT	Congés pour Recherches ou Conversions Thématiques	GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
CRDS	Cavity ring-down spectroscopy	GREC	Groupe Régional d'Experts sur le Climat
CSOA	Commission Spécialisée Océan Atmosphère	HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
DOI	Digital Object Identifier	ICDP	International Continental Scientific Drilling Program
DRAC	Directions Régionales des Affaires Culturelles	IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la mer, établissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement		
ECORD	European Consortium for Ocean Research Drilling		

IGSN	International Generic Sample Number (auparavant International Geological Sample Number)	LEFE-IMAGO	« Interactions Multiples dans l'Atmosphère, la Glace et l'Océan » (maintenant « CLIMAGO » pour « Étude du système Climatique et de ses composantes Atmosphère, Glace et Océan ») est une sous partie du programme national LEFE
IMOG	International Meeting on Organic Geochemistry		
INEE	Institut écologie et environnement du CNRS	LIA	Laboratoire International Associé
INIST	Institut de l'Information Scientifique et Technique	ILTER	Long-Term Ecological Research
INQUA	International Union for Quaternary Research	MedECC	Mediterranean Experts on Climate and environmental Change
INRAP	Institut National de Recherches Archéologiques Préventives	MICADAS	Mini Carbon Dating System
INSHS	Institut des sciences humaines et sociales du CNRS	MITI	Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires, ayant pour objectifs principaux de soutenir des programmes de recherche interdisciplinaires et des initiatives transverses au sein du CNRS, d'organiser des colloques prospectifs et de coordonner des réseaux métiers et technologiques transverses.
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS		
INTERRVIE	Terre vivante – Interactions Terre/Vie du Programme Tellus	MNHN	Muséum National d'Histoire Naturelle
IODP	International Ocean Discovery Program	MPT	Mid-Pleistocene Transition
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services	Neotoma	Neotoma Paleoecology Database
IPCC	International Panel on Climate Change	NERC	Natural Environment Research Council (Royaume-Uni)
IPEV	Institut polaire français Paul-Émile Victor	NSF	National Science Foundation (USA)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement, établissement public à caractère scientifique et technologique français sous la tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération, remplaçant l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer	OA	Domaine Océan Atmosphère (CNRS-INSU)
IRSL	Infrared stimulated luminescence, méthode proche de l'OSL, mais basée sur une stimulation de la luminescence par l'infrarouge	OHM	Observatoire Hommes-Milieus
		ONF	Office National des Forêts
		OSL	Optical Stimulated Luminescence dating, méthode de datation mesurant le délai écoulé depuis le moment où certains minéraux ont pour la dernière fois été exposés au soleil
		OSU	Observatoires des Sciences de l'Univers, structures fédératives régionales relevant de l'INSU-CNRS
LEFE	« Les Enveloppes Fluides et l'Environnement » : programme national et inter-organismes coordonné et géré par le CNRS-INSU. Soutenu par plusieurs organismes partenaires: l'ADEME, le CEA, le CNES, le CNRS (INSU, INC, INP), Fondation Air Liquide, l'IFREMER, l'INRIA, l'IRD, Météo-France, le MTE et MERCATOR-Océan.	OZCAR	infrastructure de recherche nationale dédiée à l'Observation et à l'étude de la Zone Critique
		PAGES	Past Global Changes Program
		PANGAEA	Data Publisher for Earth & Environmental Science (https://www.pangaea.de/)
		PEPR	Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche
LEFE-CYBER	« Cycle Biogéochimiques, Environnement et Ressources » est une sous partie du programme national LEFE	PETM	Paleocene Eocene Thermal Maximum

PICS	Projet International de Coopération Scientifique
PMIP	Paleoclimate Modeling Intercomparison Project
PRACE	Partnership for Advanced Computing in Europe
RÉGEF	Réseau Géochimique et Expérimental Français
SATT	Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies
SIC	Domaine Surfaces et Interfaces Continentales (INSU)
SNO	Service National d'Observation
SYSTER	Action Système Terre, processus et couplages du Programme Tellus
Tellus	Programme du domaine Terre Solide du CNRS-INSU
TRACCS	PEPR exploratoire « Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques »
TS	Domaine Terre Solide (CNRS-INSU)
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture, institution spécialisée internationale de l'Organisation des Nations unies
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCC), convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques mettant en place un cadre global de l'effort intergouvernemental pour faire face au défi posé par les changements climatiques.
WCRP	World Climate Research Program
ZA	Zone Atelier



Annexes

Contributeurs

De nombreuses personnes ont contribué à l'élaboration du livre blanc, que ce soit au travers des journées de réflexions, de l'aide pour rassembler les données nécessaires pour les analyses des groupes de travail du comité, des réponses aux questionnaires, la rédaction de paragraphes, d'illustrations ou les relectures du livre blanc. Les listes ci-dessous ne sont pas exhaustives et, dans certains cas, une personne ayant servi de point de contact représente un ensemble plus large sans lequel les données n'auraient pas pu être fournies.

POINTS DE CONTACT POUR LA FOURNITURE DE DONNÉES AYANT SERVI AU LIVRE BLANC

Analyse bibliométrique : L'étude bibliométrique a été réalisée par Nathalie Antonot du service « Appui au pilotage scientifique » de l'Institut de l'information scientifique et technique (INIST), service dirigé par Patricia Mahafaka Ranoarisoa. Cette étude a bénéficié de la contribution de Lucas Anki du service « Text & Data Mining » de l'INIST, et du service « Ressources linguistiques multilingues » de l'INIST.

Données et pre-analyses des appels d'offres :

AAP INSU-TelluS : Sébastien Clausen (resp. Interview) et Yannick Donnadieu (Resp. Syster).

AAP INSU-LEFE : Boutheina Ben Hassen.

AAP INEE : Agnès Mignot, Martine Regert et Anne Lucas.

Europe : Laura Sedaine, Coordinatrice Europe et international INSU.

AAP ANR et cahier de l'ANR n°15 « Paléoenvironnements et sociétés humaines » : Anne-Hélène Prieur, Mélanie Pateau, Bérengère Broche et Mathieu Ghilardi.

Éléments issus de la Programmation Nationale de la Recherche Archéologique (PNRA) 2023 : Véronique Zech-Matterne.

Analyses des données IODP et ECCORD : Kazuyo Tachikawa et Gilbert Camoin.

Données relatives aux effectifs des étudiants et données sur les enseignements : Laurence Vidal, Annick Chauvin, Nicolas Tribovillard, Jean-Yves Reynaud.

Effectifs IRD : Sabine Tostain.

PARTICIPATION AUX RÉUNIONS RÉGIONALES

Premier cycle de réunions (été 2021)

Région SE : Arnaud Vinçon-Laugier, Brigitte Talon, Bruno Wilhelm, Charline Giguet-Covex, Charly Favier, Claire Delhon, Claude Colombié, Doris Barboni, Emanuela Mattioli, Emilie Capron, Emmanuel Desclaux, Emmanuel Gandouin, Erwan Messenger, Françoise Chalie, Frédéric Guibal, Frédéric Parrenin, Guillaume Guinot, Guillemette Menot, Ilhem Bentaleb, Isabelle Couchoud, Janet Battentier, Jean-François Berger, Jean-Philip Brugal, Jean-pierre Suc, Kazuyo Tachikawa, Laurence Vidal, Laurent Bremond, Laurent Husson, Lucie Chabal, Nathalie Vigier, Odile Peyron, Pascale Huyghe, Patricia Martinerie, Philippe Leveau, Rodolphe Tabuce, Romain Amoit, Sébastien Joannin, Stéphane Guedron, Walter Finsinger, Yannick Garcin.

Région SW : Florence Verdin, Jean-Renaud Boisserie, Gildas Merceron, Antoine Souron, Maria Fernanda Sanchez-Goni, Didier Swingedouw, Xavier Crosta, Emilie Dassié, Linda Rossignol, Thibaut Caley, Dominique Genty, Frédérique Eynaud, Bruno Malaizé.

Région NW : Sylvie Bourquin, Cécile Robin, Stefan Jorry, Nathalie Babonneau, Luc Bulot, Daniel Aslanian, Bernadette Tessier, Maxime Debret, Mary Elliot, David Menier, Evelyne Goubert, Hélène Tissoux, Anaëlle Simonneau, Hélène Howa, Meryem Mojtahid, Taniel Danelian, Viviane Bout Roumazeilles, Elise Chenot, Guillaume Dupont-Nivet.

Région NE : Emmanuelle Pelletier, Laurent Millet, Guillaume Paris, Arnaud Brayard, Mathieu Schuster, Ferréol Salomon, Vincent Ollive, Pierre-Henri Blard, Fabien Arnaud.

Région IdF : Jérémy Jacob, Sylvie Crasquin, Loïc Segalen, Amaëlle Landais, Giovanni Aloisi, Eva Moreno, Pierre Sepulchre, Guillaume Le Hir, Laurent Riquier, Charlotte Skonieczny, Magali Bonifacie, Peggy Vincent, Gilles Ramstein, Franck Bassinot, Myriam Khodri, Didier Paillard, Olivier Moine, Frédéric Fluteau, Millena Frouin, Vincent Lebreton, Jean-Baptiste Ladant, Matthieu Carré, Annachiara Bartolini, Nicole Limondin-Lozouet.

Deuxième cycle de réunions (printemps 2022)

Région SE : Guillaume Leduc, Emanuela Mattioli, Thibault de Garidel, Claire Delhon, Vincent Rinterknecht, Laurence Vidal, Kazuyo Tachikawa, Clara Bolton, Emmanuel Desclaux, Guillaume Guinot, Patricia Martinerie, Thomas Camagny, Aurélie Liard, Marie Revel, Vincent Montade, Charline Giguët-Covex, Vincent Jomelli, Joël Savarino, Séverine Fauquette.

Région SW : Jérôme Bonnin, Thibaut Caley, Anne-Laure Daniau, Maria-Fernanda Sanchez-Goni, Antoine Souron, Eric Chaumillon, Jean-Renaud Boiserie, Florence Verdin, Bruno Malaizé, Frédérique Eynaud.

Région NW : Sylvie Bourquin, Cécile Robin, Olivier Dauteuil, Marina Rabineau, Bernadette Tessier, Natalia Vazquez Riveiros, Hélène Tissoux, Annaëlle Simonneau, Meryem Mojtahid, Mathieu Martinez, Mary Elliot.

Région NE : Pierre-Henri Blard, Guillaume Paris, Matthieu Schuster, Emmanuelle Montarges, Laurent Millet, Arnaud Brayard, Ferréol Salomon, Vincent Ollive.

Région IdF : Amaëlle Landais, Annachiara Bartolini, Brigitte Senut, Cécile Chapron, Charlotte Skonieczny, Dominique Gommery, Didier Paillard, Eva Moreno, Fabio Berzaghi, Franck Bassinot, Frédéric Fluteau, Gilles Ramstein, Giovanni Aloisi, Guillaume Le Hir, Jean-Baptiste Ladant, Jérémy Jacob, Johann Schnyder, Laurence Le Callonnec, Laurent Riquier, Loïc Segalen, Magali Bonifacie, Matthieu Carré, Millena Froin, Myriam Khodri, Nathaëlle Bouttes, Nicolas Viovy, Nicole Limondin-Lozouet, Olivier Moine, Peggy Vincent, Pierre Sepulchre, Sylvie Crasquin, Vincent Lebreton, Magali Ader.

RÉUNIONS NATIONALES

Journées nationales, distanciel (11-12 mai 2021)

Présentations invitées : Raphaël Pik, Masa Kageyama, Pierre Sepulchre, Roberto Grilli, Frédéric Huyhn, Baptiste Suchéras-Marx.

Inscrit.e.s : Pascale Braconnot, Guillaume Leduc, Thibault de Garidel-Thoron, Franck Bassinot, Fabien Arnaud, Kazuyo Tachikawa, Maxime Debret, Olga Otero, Maria-Fernanda Sanchez Goni, Damien Huyghe, Guillaume Paris, Patricia Martinerie, Jean-Philippe Jenny, Natalia Vazquez-Riveiros, Johan Etourneau, Annachiara Bartolini, Elisabeth Gibert, Jean-Philippe Brugal, Matthieu Ghilardi, Mary Elliot, Anaëlle Simonneau, Mathieu Schuster, Ilham Bentaleb, Isabelle Domaizon, Gwenael Herve, Anne-Laure Daniau, Pierre-Henri Blard, Vincent Ollivier, Guillaume Le Hir, Frédéric Fluteau, Thibaut Caley, Edouard Bard, Olivier Moine, Justine Briaïs, Mélanie Saulnier, Aline Govin, Carlo Mogni, Christophe Colin, Tatiana Theodoropoulou, Laurence le Callonnec, Laurent Dezileau, Boris Vannièr, Frédérique Eynaud, Jérémy Jacob, Alexandre Tarantola, Chantal Leroyer, Jean-Noël Proust, Thomas Extier, Stéphanie Desprat, Selwa Benhaddou, Jean-François Doussin, Elisabeth Michel, Dominique Genty, Laurent Emmanuel, Nathaëlle Bouttes, Jill Sutton, Sylvie Crasquin, Florence Mazier, Benoît Hazard, Pierre Antoine, Vanessa Py, Berangere Leys, Marjan Mashkour, Hélène Tissoux, Marie Bal, Florence Quesnel, Sébastien Joannin, Hugues Bauer, Pierre Pellenard, Julie Dabkowski, Fatima Laggoun, Charline Giguët-Covex, Frédéric Parrenin, Catherine Girard, Peggy Vincent, Loïc Segalen, Myriam Khodri, Guillemette Ménot, Sylvain Pichat, Jean-Baptiste Ladant, Nathalie Vigier, Marie Revel, Romain Amiot, Damien Rius, Guillaume Guinot, Guillaume Dupont-Nivet, Slah Boulila,

Diane Segalla, Magali Bonifacie, Frederic Huynh, Jean-Renaud Boisserie, Cécile Robin, Antoine Souron, Marina Rabineau, Bérengère Broche, Emanuela Mattioli, Florence Verdin, Clara Bolton, Vincent Jomelli, Pierre Sepulchre, Meryem Mojtahid, Philippe Sorrel, Anne-Lise Develle, Philippe Martinez, Vincent Rinterknecht, Chantal Leroyer, Didier Paillard, Romain Delunel, Vincent Grossi, Anne-Laure Decombeix, Franck Guy, Nicole Lozouet, Patrick Auguste, Baptiste Suchéras-Marx, Taniel Danelian, Roberto Grilli, Isabelle Jouffroy, Nicolas Thouveny, Matthieu Carré, Laurent Lespez, Sylvie Bourquin, Nadine Tisnerat.

Journées nationales, Paris (20-21 octobre 2022)

Invités table ronde ou grands témoins : Valérie Masson-Delmotte, Anne-Marie Lézine, Christian France-Lanord, Marie-Hélène Moncel, Wolfgang Cramer, Philippe Choler, Eric Chaumillon.

Thibault de Garidel, Myriam Khodri, Guillaume Leduc, Pascale Braconnot, Eva Moreno, Masa Kageyama, Stéphanie Thiebault, Jean-Claude Dutay, Jean-Baptiste Regnet, Meryem Mojtahid, Jérémy Jacob, Natalia Vazquez-Riveiros, Damien Huyghe, Bérengère Broche, Marie Revel, Camille Risi, Claire Delhon, Frédéric Fluteau, Jean-François Pastre, Bruno Turcq, Fabien Arnaud, Patricia Turcq, Claude Cosandey, Anne-Laure Daniau, Guillaume Le Hir, Elisabeth Michel, Franck Bassinot, Pierre Sepulchre, Anne-Marie Lézine, Emilie Dassié, Patricia Martinerie, Jean-Renaud Boisserie, Bruno Malaizé, Sophie Sepulchre, Annachiara Bartolini, Pierre-Henri Blard, Laurence Vidal, Kazuyo Tachikawa, Mary Elliot, Meryem Mojtahid, Johan Etourneau, Sébastien Nguyen, Didier Paillard, Mélanie Pataud, Natalia Vazquez-Riveiros, Giuseppe Siani, Gwenaël Hervé, Marie-Hélène Moncel, Eric Chaumillon, Nathaëlle Bouttes, Christian France-Lanord, Olivier Moine, Jean-Baptiste Ladant, Charlotte Skonieczny, Cécile Robin, Sylvie Bourquin, Aline Govin, Matthieu Carré, Jacques Laskar, Wolfgang Cramer, Guillaume Paris, Masa Kageyama, Jean-Philippe Jenny, Gilles Ramstein, Mary Elliot, Pierre Antoine, Millena Frouin, Cécile Agosta, Philippe Fosse, William Gray, Anne-Marie Moigne, Guillaume Dupont-Nivet, Pierre Pellenard, William Banks, Valérie Daux, Laurie Barrier, Jean Jouzel, Laurence Le Callonec, Christelle Marlin, Elisabeth Gibert-Brunet, Marie-Pierre Ledru.

Paragraphe, figure ou relecture du livre blanc

Anne-Laure Daniau, Émilie Dassié, Frédéric Fluteau, Gwenaëlle Goude, Masa Kageyama, Jean-Baptiste Ladant, Guillaume Le Hir, Laurent Lespez, Olivier Moine, Elisa Nicoud, Guillaume Paris, Frédéric Parrenin, Anaëlle Simonneau, Maria-Fernanda Sanchez-Goni, Jean-Philippe Brugal, Gilbert Camoin, Gilles Ramstein, Pierre Sépulchre.

Suivi et support INSU et INEE

Directeurs et directeurs scientifiques adjoints : Nicolas Arnaud, Jean-François Doussin, Bruno Blanke, Fatima Laggoun, Séphane Guillot, Stéphane Blanc.

Support à l'organisation des journées nationales : Claire Étienne, Duane Bretel, Selma Benhaddou.

Communication et édition : Anne Bres, Julie Amblard.

LABORATOIRES PRINCIPAUX

CODE UNITÉ		INTITULÉ	ADRESSE	TUTELLES PRINCIPALES	TUTELLES SECONDAIRES
UMR7209	AASPE	Muséum National d'Histoire Naturelle	Département Homme et Environnement Bât.56, 55 rue Buffon BP 56 PARIS CEDEX 05 75231 PARIS 05	2 - MNHN 130 - CNRS	
UMR6282	BIOGEOSCIENCES	Université de Bourgogne Franche-Comté	Bâtiment GABRIEL, 3 ^e Etage 6 Bd Gabriel BP 27877 DIJON 21000 DIJON	33683 - COMUE UBFC 130 - CNRS	178 - EPHE - PSL
UMR7264	CEPAM	Université Nice Sophia Antipolis	Pôle Universitaire Saint Jean d'Angély SJA 3 – CEPAM UMR7264 – CNRS – UNS24, avenue des Diablos Bleus F – 06300 NICE	130 - CNRS	
UMR7330	CEREGE	Aix-Marseille Université	De l'Arbois Europôle Méditerranéen BP 80 AIX EN PROVENCE CEDEX 4 13545 AIX EN PROVENCE	16651 - AIX-MARSEILLE UNIV 130 - CNRS 631 - INRAE 11204 - IRD	177 - Collège de France
UMR6249	CHRONO-ENVIRONNEMENT	Université de Bourgogne Franche-Comté	UFR Sciences et Techniques 16 Route de Gray 25030 BESANCON	33683 - COMUE UBFC 130 - CNRS	
UMR7207	CR2P	Sorbonne Université, Muséum National d'Histoire Naturelle	8 Rue Buffon - CP 38 75005 PARIS 05	2 - MNHN 130 - CNRS 28932 - SORBONNE UNIV	
UMR7358	CRPG	Université de Lorraine	15 Rue Notre-Dame des Pauvres BP 20 VANDŒUVRE LES NANCY CEDEX 54501 VANDŒUVRE LES NANCY	130 - CNRS 17244 - UNIV LORRAINE	
UMR5204	EDYTEM	Université Grenoble Alpes	UFR ScEM - Pôle Montagne 5 bd de la Mer Caspienne 73376 LE BOURGET DU LAC	130 - CNRS 144 - UNIV SAVOIE MONT BLANC	563 - Ministère de la culture
UMR5805	EPOC	Université de Bordeaux	EPOC - CS 50023 Allée Geoffroy Saint Hilaire 33615 PESSAC	130 - CNRS 20763 - UNIV BORDEAUX 12772 - BORDEAUX INP	178 - EPHE - PSL
UMR8148	GEOPS	Université Paris Saclay	Dépt. des sciences de la terre Bâtiments 504 91405 ORSAY	130 - CNRS 34148 - UNIV PARIS-SACLAY	
UMR6118	GEOSCIENCES RENNES	Université de Rennes	Bat. 14b 15 - campus de Beaulieu 263 Av du général Leclerc BP 74205 RENNES CEDEX 35042 RENNES	130 - CNRS 40311 - UNIV RENNES	
UMR5243	GEOSCIENCES-MONTPELLIER	Université Montpellier	Bâtiment 22 2 Place Eugène Bataillon BP 60 MONTPELLIER CEDEX 5 34095 MONTPELLIER	30 - CNRS 38034 - UNIV MONTPELLIER	205 - UNIV ANTILLES
UMR5563	GET	Université Toulouse III	Observatoire Midi-Pyrénées 14 avenue Edouard Belin 31400 TOULOUSE	68 - UNIV TOULOUSE PAUL SABATIER 130 - CNRS 1879 - CNES 11204 - IRD	

CODE UNITÉ		INTITULÉ	ADRESSE	TUTELLES PRINCIPALES	TUTELLES SECONDAIRES
UMR7194	HNHP	Muséum National d'Histoire Naturelle, Université de Perpignan Via Domitia	IPH 1 rue René Panhard 75013 PARIS 13	2 - MNHN 130 - CNRS 135 - UNIV PERPIGNAN VIA DOMITIA	
UMR5001	IGE	Université Grenoble Alpes	Domaine universitaire, Bât. OSUG 460 rue de la Piscine 38400 ST MARTIN D HERES	130 - CNRS 11204 - IRD 34361 - UNIV GRENOBLE ALPES 631 - INRAE	
UMR7263	IMBE	Aix-Marseille Université, Avignon Université	Faculté de St-Jérôme - Case 421 Av. escadrille Normandie-Niemen 13397 MARSEILLE 13	16651 - AIX-MARSEILLE UNIV 187 - AVIGNON UNIV 130 - CNRS 11204 - IRD	
UMR7154	IPGP	Université Paris-Cité	1 rue Jussieu 75238 PARIS 05	130 - CNRS 172 - INST PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS	206 - UNIV LA REUNION 629 - IGN
UMR5554	ISEM	Université Montpellier	Site du Triolet Bât 22 place Eugène Bataillon BP 065 MONTPELLIER CEDEX 5 34095 MONTPELLIER	130 - CNRS 11204 - IRD 38034 - UNIV MONTPELLIER	654 - INRAP 968 - CIRAD 178 - EPHE - PSL
UMR7193	iSTeP	Sorbonne Université	4 place Jussieu BP 129 PARIS CEDEX 05 75252 PARIS 05	130 - CNRS 28932 - SORBONNE UNIV	
UMR5275	ISTerre	Université Grenoble Alpes	UGA/OSUG C 1381 rue de la Piscine BP 40700 GRENOBLE CEDEX 9 38058 ST MARTIN D HERES	130 - CNRS 144 - UNIV SAVOIE MONT BLANC 11204 - IRD 34361 - UNIV GRENOBLE ALPES	34147 - UNIV GUSTAVE EIFFEL
UMR5276	LGL-TPE	Université de Lyon 1	Bât GEODE 2 rue Raphaël Dubois 69622 VILLEURBANNE	130 - CNRS 139 - UNIV CLAUDE BERNARD 167 - ENS LYON	103 - UNIV JEAN MONNET
UMR6538	LGO	Université Bretagne Occidentale	IUEM Rue Dumont d'Urville 29280 PLOUZANE	130 - CNRS 961 - IFREMER 61 - UNIV BRETAGNE OCCIDENTALE	119 - UNIV BRETAGNE-SUD
UMR6112	LGP	Nantes Université	UFR Sciences et Techniques - Labo. LPG 2 Rue de la Houssinière 44322 NANTES CEDEX 3 - France	130 - CNRS 101 - NANTES UNIV 102 - UNIV ANGERS	103 - LE MANS UNIV
UMR7159	LOCEAN	Sorbonne Université	4 Place Jussieu 75252 PARIS CEDEX 05 - France	130 - CNRS 28932 - SORBONNE UNIV 11204 - IRD 2 - MNHN	
UMR8187	LOG	Lille Université	UNIV LILLE 28 avenue Foch 62930 WIMEREUX - France	130 - CNRS UNIV LILLE UNIV LITTORAL COTE D'OPALE	11204 - IRD
UMR8212	LSCE	Université Versailles St-Quentin	bât. 12 Av de la terrasse 91198 GIF SUR YVETTE CEDEX - France	CEA 130 - CNRS	
UMR7262	PALEVOPRIM	Université de Poitiers	Bât. B35 - 3 ^e étage 6 rue Michel Brunet TSA 51106 86073 POITIERS	130 - CNRS 188 - UNIV POITIERS	

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange 75016 Paris
www.insu.cnrs.fr

