



L'évolution au Muséum

cinquième journée scientifique

19 décembre 2019

Le mot du président

Le 31 octobre 2009, paraissait au Journal officiel l'acte de naissance de la SECM, faisant suite à une assemblée générale de la société des professeurs du Muséum convoquée en juin de la même année par son président, François Fröhlich. Le but était de réunir les professeurs et les maîtres de conférences de l'établissement au sein d'une seule et même société, celle des enseignants-chercheurs du Muséum ou SECM, avec à la clé de nouveaux statuts¹ pour en définir les objectifs. Ainsi, dans l'article 2, la SECM s'engageait à entretenir un lien permanent entre les enseignants-chercheurs en poste au Muséum, à faciliter l'accomplissement de leurs missions et en assurer la continuité, à favoriser les échanges et l'interdisciplinarité et maintenir une réflexion sur la place des enseignants-chercheurs au sein de l'établissement et sur leur rôle dans le rayonnement scientifique et culturel de celui-ci.

Ayant rejoint François au sein du groupe fondateur, j'ai proposé dès 2010 que la SECM organise régulièrement une journée scientifique autour d'un thème transversal. L'idée était de parler de l'activité de recherche, d'expertise, d'enseignement, de collections et de diffusion que nous menons au Muséum. Cette journée vit très vite le jour sous forme de présentations suivies de débats. La première eut lieu en décembre 2010, sur la biodiversité ; la deuxième en 2012 sur le dispositif naturaliste, clôturée par le président Gilles Bœuf ; la troisième en 2014 sur les collections, avec l'intervention du directeur général Thomas Grenon ; et la quatrième en 2016 sur le rayonnement du Muséum, conclue par le président Bruno David. L'idée était aussi de diffuser ensuite ces journées au plus grand nombre en les transcrivant en texte, tout en gardant autant que possible la richesse de l'expression orale. Mais en 2010, nous n'avions qu'un dictaphone comme unique moyen d'enregistrement, insuffisant pour permettre une transcription complète, surtout au moment des débats. C'est pourquoi nous ne disposons, pour cette journée-là, que d'une restitution très limitée. Heureusement, dès 2012 les collègues du service multimédia² sont venus à notre rescousse et ont permis d'enregistrer à la fois le son et l'image. Ainsi, a pu se constituer petit à petit une mémoire de ces journées et de l'action de la SECM, que l'on peut consulter en ligne sous forme de pdf et de vidéos¹. Les deux sont complémentaires. Même si la transcription écrite est très chronophage et dure de longs mois, c'est un exercice très important qui permet de rajouter des compléments d'informations pour

¹ sur la plateforme de la SECM à l'adresse secmuseum.sitego.fr

² Stéphanie Targui, Frédéric Dubos et Sébastien Pagani

faciliter la compréhension. Jusqu'en 2014, les pdf étaient imprimés et les exemplaires distribués aux membres du conseil d'administration et du conseil scientifique. Mais face au coût de l'impression, nous avons opté pour une diffusion uniquement via notre plateforme internet¹. Enfin, le découpage et le montage des vidéos est aussi un gros travail qu'il faut saluer.

A l'occasion des 10 ans de la SECM, nous consacrons ici la cinquième journée à l'évolution au Muséum, d'après une idée originale d'Amélie Vialet, présidente adjointe de la SECM, aux côtés de Sandrine Grouard. Nous avons prévu de commencer par une perspective historique suivie de deux parties, le matin sur l'enseignement et la diffusion, puis l'après-midi sur la recherche, l'expertise et les collections. Cependant, le collègue qui devait se charger de l'historique ayant renoncé, nous avons dû faire sans. Je voudrais quand même conseiller la biographie de Lamarck³ par Yves Delange, parue en 2002, et l'ouvrage intitulé L'évolution au Muséum, Albert Gaudry⁴ par Pascal Tassy, paru en juin 2020. La première partie aborde donc l'enseignement et la diffusion de l'évolution au Muséum. Là encore des désistements en ont réduit le contenu et n'ont pas permis de montrer comment l'évolution est traitée dans l'école doctorale ED 227 ou par la muséographie, et comment l'imaginaire peut permettre de parler d'évolution au jeune public. Cette première partie est quand même riche. Elle aborde le module d'enseignement en ligne AFFRODIT, le master SEP, la formation des enseignants du premier et second degré, le rôle des publications scientifiques, l'arbre du vivant en réalité virtuelle à la GGE et se termine par un débat modéré par Guillaume Lecointre sur la place du Muséum dans l'enseignement et la diffusion de la théorie de l'évolution en France. La deuxième partie n'est pas en reste. Elle donne des exemples de projets de recherche très intéressants sur l'évolution des papillons *Morpho* au Pérou, sur les apports de la génétique moderne dans l'évolution de l'Homme et sur la paléogénétique des migrations humaines en Asie centrale dans le cadre d'un doctorat. Viennent ensuite une présentation : du rôle de la Société Française d'ichtyologie, hébergée au Muséum, dans la recherche et la diffusion des savoirs ; de l'évolution des modèles de publications, complétant très bien ce qui a été dit le matin ; de l'utilité des collections d'insectes et de l'Herbier national pour étudier l'évolution ; et pour finir un débat modéré par Gaël Clément sur les transversalités qui existent entre recherche, expertise et collections au Muséum.

³ Yves Delange (2002) Jean-Baptiste Lamarck, éditions Acte Sud, 219 pages

⁴ Pascal Tassy (2020) L'évolution au Muséum, Albert Gaudry, éditions Matériologiques, 252 pages. Gaudry succéda à Alcide d'Orbigny à la chaire de paléontologie du Muséum en 1872.

Cette cinquième journée scientifique est pour moi la dernière en tant que président. Après plusieurs mandats, il est temps que je passe le relais, avec le sentiment d'une mission accomplie. Depuis le début, j'ai choisi de cantonner l'action de la SECM à l'animation scientifique, ce qui est certes réducteur au regard de ses objectifs statutaires, mais a contribué à lui construire une identité et à lui donner une certaine notoriété. La SECM est connue au Muséum et commence à l'être au-delà. En effet, une étudiante en M1 à Brest a fait le déplacement pour assister à cette cinquième journée, suite à l'intervention de notre collègue Michel Van Praët dans le cadre d'un séminaire qu'il avait donné au master d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques de l'université de Brest. Cependant, malgré cette notoriété, il y a encore à faire. En effet, sur la page d'accueil du Muséum, on note la présence d'un certain nombre de sociétés hébergées, trois de soutien et 62 sociétés savantes, mais pas de trace de la SECM, alors qu'elle bénéficie d'une convention d'hébergement. Selon moi, la SECM, qui n'est pas une société savante, devrait faire partie des sociétés de soutien au Muséum.

Avant de laisser la place à la lecture, je voudrais exprimer toute ma gratitude aux 18 intervenant(e)s qui ont donné beaucoup de contenu à cette journée. Ils sont nommés au fur et à mesure. Je remercie aussi Nicolas Gentis, étudiant du master SEP, qui s'est chargé bénévolement de la captation et du montage des vidéos. On lui doit aussi le logo de la SECM. Merci à Frédéric Dubos, chef de projet audiovisuel et réalisateur au Muséum qui a prêté le matériel de captation, avec beaucoup de gentillesse. Merci enfin à Cyril Roguet, adjoint au directeur général délégué aux Musées et aux Jardins botaniques et zoologiques, et aux collègues de la régie qui ont fourni le micro amplificateur.

Voilà, je souhaite longue vie aux journées scientifiques de la SECM et à tous une agréable et enrichissante lecture.

Laurent Palka
président de la SECM

cinquième journée scientifique de la SECM

L'EVOLUTION AU MUSEUM

sommaire

I. Enseigner et diffuser l'évolution au Muséum	2
1. L'enseignement de la construction de la théorie de l'évolution dans le module en ligne AFFRODIT par <i>G. Billet et D. Germain</i>	2
2. La formation de master SEP (Systématique, Evolution, Paléontologie) au sein du Muséum par <i>R. Vignes-Lebbe</i>	6
3. Former les enseignants du premier et second degré à l'enseignement de l'évolution par <i>E. Détouillon</i>	12
4. Le rôle des publications scientifiques dans la diffusion des connaissances sur l'évolution par <i>L. Bénichou et T. Robillard</i>	17
5. Voyage au coeur de l'évolution: un programme de réalité virtuelle par <i>S. Targui</i>	23
6. débat : La place du Muséum dans l'enseignement et la diffusion de la théorie de l'évolution en France, <i>modération G. Lecointre</i>	28
 II. L'évolution dans la recherche, l'expertise et des collections au Muséum.....	47
1. Evolution des formes et des couleurs chez les papillons <i>Morpho</i> : des collections au terrain par <i>V. Debat</i>	47
2. Evolution de l'Homme, apports de la génétique moderne par <i>L. Ségurel</i>	52
3. Doctorat sur la paléogénétique des migrations humaines en Asie centrale par <i>P. Guarino-Vignon</i>	59
4. La Société Française d'ichtyologie, quel rôle dans la recherche et la diffusion des savoirs par <i>P. Keith</i>	64
5. Le libre accès aux publications des chercheurs du Muséum: objectifs 2020 par <i>M. Guiraud et G. Illien</i>	69
6. Les collections, une plaque tournante pour l'étude de l'évolution des insectes par <i>A. Soulier-Perkins</i>	77
7. Collections et évolution par <i>D. Germain</i>	82
8. L'Herbier national et l'étude de l'évolution des espèces par <i>M. Gaudeul</i>	28
9. débat : Quels sont les apports des transversalités Collections/Recherche dans l'étude de l'évolution du vivant au Muséum ? <i>modération G. Clément</i>	92

I. Enseigner et diffuser l'évolution au Muséum

1. *L'enseignement de la construction de la théorie de l'évolution dans le module en ligne AFFRODIT par Guillaume Billet et Damien Germain Maîtres de conférences⁵, équipe pédagogique d'AFFRODIT*

Damien Germain.- L'acronyme AFFRODIT signifie « s'AFfranchir des FROntières entre les DIsciplines Traditionnelles ». C'est un enseignement en ligne qui a commencé en 2014 à destination des licences puis s'est ouvert aux masters. L'un des buts initiaux étaient de déconstruire la notion de discipline. Aujourd'hui, il s'agit plutôt d'illustrer comment les disciplines ont évolué, montrer qu'elles n'ont pas toujours été dans un cadre très restreint, s'interroger sur les échanges qui peuvent naître entre elles, sur les apports que ces échanges peuvent amener, parler - c'est un peu à la mode - des termes pluri-, inter- et transdisciplinarité et voir des applications dans différents domaines scientifiques. L'équipe a évolué et comporte aujourd'hui 8 intervenants et deux ingénieures pédagogiques (figure 1). Au départ, il y avait Guillaume Billet et Lapo Boschi (SU).



Fig. 1 : L'équipe actuelle d'AFFRODIT © Carole Francq

⁵ G. Billet et D. Germain sont membres de l'UMR 7207 Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements MNHN/SU/CNRS

⁶ Guillaume Billet, Pascale Debey, Nathalie Ginoux, Damien Germain, Eric Lateltin, Laurent Palka, Claudio Rosenberg, Carole Vercoutère, Amélie Vialet, Pierre Voinchet

L'enseignement AFFRODIT comprend quatre chapitres : le premier présente un cadre conceptuel, le suivant parle des théories, dont celle de l'Evolution dont il sera question, un autre des méthodes et le quatrième est dédié aux applications. Chaque chapitre a une plage de temps d'étude définie où il est ouvert en ligne. Il y a des rencontres. Le module n'est pas totalement dématérialisé - c'est même une demande des étudiants - avec une réunion de lancement en début d'année, puis d'autres pour les modules du second semestre, des échanges avec les enseignants, des visites de plates-formes. L'évaluation des acquis se fait par un quiz à la fin de chaque chapitre, complétée par un examen final qui compte pour 60 % de la note. L'examen final est un exposé sur un sujet que les étudiant(e)s nous proposent, que l'on refuse parfois en cas de hors sujet et dans ce cas on les réoriente, avec un rendu écrit et un oral. On accède à ce module par le moodle du Muséum. Il faut se connecter, visiter les enseignements de licence voire de master où l'on peut trouver ce module et consulter le contenu.

Le cadre conceptuel ou fondamental explique toutes les notions : qu'est-ce qu'une discipline et comment les disciplines ont évolué, que signifient pluri-, inter- et transdisciplinarité. C'est un gros travail, réalisé entre autres par Laurent Palka. On découvre les relations entre les disciplines, la réalité et les niveaux de réalité. On insiste sur le sens des mots car on entend souvent pluri-, inter- et transdisciplinarité utilisés de manière non-adéquate. J'aimerais à terme que cette partie fondamentale soit ouverte à tous les chercheurs et enseignants-chercheurs afin que chacun sache vraiment ce que ces mots signifient et ce que recouvrent les relations entre les disciplines. Cette première partie aboutit à un quiz. Ensuite vient le chapitre « théories ». On demande de choisir parmi les quatre proposées car l'ensemble serait trop à apprendre en un mois. En fonction des niveaux, L2, L3 ou Master, on peut demander de ne choisir qu'un des cours, une des théories. Un cours est consacré à la construction de la théorie de l'Evolution. C'est un cours sur la façon dont la théorie s'est construite au cours du temps. Les autres exemples sont l'(H)Omo Event et l'East Side Story, la Terre en mouvement à travers la tectonique des plaques et enfin l'histoire de la chimie. La théorie de l'Evolution est découpée en deux parties : la première consacrée aux premières étapes de la construction de la théorie avec Darwin (et même un peu avant, et ce qui le suit) et la deuxième dédiée à la construction moderne et des apports des différentes disciplines pour aboutir à la théorie telle qu'on la connaît aujourd'hui. Dans le troisième chapitre sur les méthodes, les étudiant(e)s doivent choisir entre les méthodes de datation et l'histoire des méthodes d'imagerie sous toutes ses formes. Et enfin les applications concernent

au choix, l'Homme de Néandertal et l'image qu'on a pu avoir de lui, l'animal paléolithique, les gaulois et l'ethnomusicologie.

Revenons au cœur du sujet d'aujourd'hui : la construction de la théorie de l'Evolution, avec ses deux grandes parties. On s'y intéresse de manière non-exhaustive. Ce n'est pas un cours complet car les deux, « Darwin » et l'actuel, doivent tenir en un mois, et sont faites de manière séquentielle. Cette session va du 21 octobre jusqu'au 17 novembre, ce qui fait un peu moins d'un mois. Le quiz est ouvert assez vite. Les étudiants peuvent y répondre et retourner à leur cours. Dans l'ensemble c'est assez bien réussi, mais ils n'ont qu'une seule tentative. On fait souvent des rappels sur le forum associé à ce module sur lequel on peut répondre assez rapidement aux questions des étudiants. On ne leur donne évidemment pas les réponses au quiz mais on les oriente comme on peut. Voici un exemple de la façon dont ce module est présenté en ligne (figure 2). La partie I commence par la variation morphologique. Elle a été élaborée avec l'aide des ingénieurs pédagogiques. On leur indiquait les idées principales, on faisait des listes de concepts, quelques petits textes et les ingénieurs pédagogiques les mettaient en forme. Cette partie, illustrée par des diaporamas, parfois des vidéos, commence par le constat de Darwin qu'il y avait une variation morphologique, des variations intraspécifiques. L'étudiant clique sur les différents boutons pour avancer ou revenir. Le

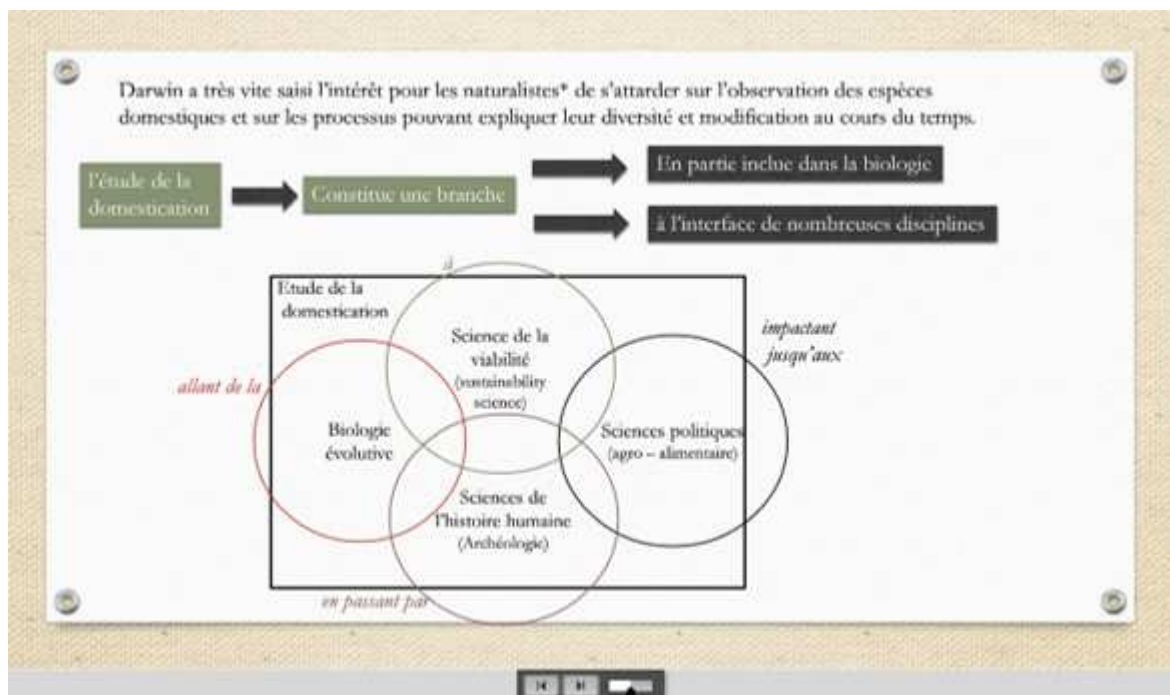


Fig. 2. AFFRODIT, partie 1 : Etude de la domestication à l'interface de nombreuses disciplines © Carole Francq

schéma illustre ce que l'on essaie de faire comprendre aux étudiants : les liens qui existent entre différentes disciplines et la façon dont ces liens apportent quelque chose de nouveau. C'est ce que l'on essaie de leur faire dire après lors de leur exposé. On part donc de la variabilité morphologique en passant par une bonne partie de la construction de la théorie de l'Evolution selon Darwin et ses contemporains. On passe ensuite à la construction moderne. On commence par les découvertes de l'hérédité génétique avec les apports de Mendel et ceux qui ont suivi. Il y a beaucoup de sous parties et des vidéos enregistrées nous-mêmes et d'autres qui avaient été trouvées par un emploi étudiant, qui avait fait beaucoup de travail de recherche documentaire que ce soit au niveau de l'iconographie et des vidéos. Certaines existaient déjà mais d'autres sont originales.

La construction de ce cours en ligne a commencé en 2014 avec la première « promotion » durant l'année 2015-2016, ce qui nous a laissé un an et demi pour mettre le contenu, ce qui a été assez intense. Il y avait beaucoup à faire. Construire un cours en ligne était nouveau pour nous tous. Il a fallu apprendre certains concepts. Par exemple, je me souviens que l'on avait découvert celui de grains pédagogiques⁷. On a donc appris en attachant de l'importance au sens des mots. La construction d'AFFRODIT continue d'année en année. Quand on a commencé, il y avait le cadre fondamental, deux théories et une méthode. Petit à petit, on évolue, nous aussi. On rajoute de nouveaux cours, on modifie les anciens. Jusqu'à présent, il y a eu quatre années universitaires complètes. En deux semestres par an, on a donc eu huit « promotions », et une cinquième année est en cours. AFFRODIT va des licences deuxième et troisième années au M1, principalement des sciences de la vie mais aussi les mineures patrimoine et relations Nord-Sud, de la chimie, de l'archéologie, un parcours de L3 histoire et philosophie des sciences et techniques. On a également depuis deux ans le Master EBE qui propose ce module. En tout, 125 étudiants l'ont suivi. Leurs retours sont souvent favorables. Si parfois ils ne sont pas très contents qu'on leur impose ce module, la plupart du temps ils le choisissent spontanément.

Ce que les étudiants apprécient (et nous aussi), c'est le contact humain qui n'est pas absent dans ce module en ligne. On peut avoir des échanges dès le début pendant la présentation, au cours des visites des plates-formes et lors de l'oral final. On interagit et c'est très important.

⁷ Le grain pédagogique désigne la plus petite unité d'apprentissage d'un parcours pédagogique.

2. La formation de master SEP (Systématique, Evolution, Paléontologie) au sein du Muséum par Régine Vignes-Lebbe⁸, Professeure SU coordinatrice du master SEP

Je suis enseignant-chercheur au Muséum, mais pas du Muséum, et je vais vous présenter le master Systématique, Evolution, Paléontologie (dit SEP), dont je suis une des coordinatrices, en axant ma présentation sur l'utilisation des ressources, les encadrements, comment ça se passe et le devenir des étudiants au Muséum. Un certain nombre d'intervenants du master sont présents dans la salle. Donc lors du débat on pourra discuter de tous les points que j'aurais omis de présenter.

L'offre de master, vous la connaissez, comprend sept parcours dont celui de SEP. EBE, puisqu'on en a parlé précédemment, correspond maintenant aux premiers parcours, ECIRE et EEF⁹. Avant d'en arriver à l'utilisation des ressources, aux contenus du master, je voudrais dire quelques mots sur l'origine de sa mise en place. Si la SECM fête ses 10 ans, le Master fête ses 15 ans puisqu'il a été mis en place en 2004. Il s'est construit à partir de ce qui existait avant et en particulier pour SEP, à partir de la maîtrise de biologie des populations et des écosystèmes à l'UPMC, qui avait une orientation systématique, et deux DEA, un au Muséum le DEA de Systématique animale et végétale, et un à l'UPMC, le DEA de Biodiversité (génétique, histoire, mécanismes de l'évolution). Une réflexion a été menée à partir de ces formations-là, avec un certain nombre de collègues. Certains n'interviennent plus aujourd'hui dans le Master SEP mais ont joué un rôle important dans sa mise en place et ses enseignements, comme Hervé Le Guyader, Jean Broutin, Pascal Tassy. Aujourd'hui, SEP est une formation conjointe entre le Muséum et Sorbonne Université, avec une volonté de ne pas séparer l'étude de la systématique sur les organismes actuels et fossiles et d'étudier l'évolution sur le temps long. On verra que cette formation est centrée sur les concepts et les méthodes. L'acronyme SEP a correspondu pendant un temps à systématique, évolution, paléobiodiversité parce que nos collègues de SU avaient trouvé que paléontologie faisait ringard. Pendant un contrat, il a donc fallu remplacer paléontologie par paléobiodiversité, ce qui a permis de garder l'acronyme SEP grâce à Pascal Tassy qui avait eu cette bonne idée. Ce qui était initialement une spécialité de master est devenue aujourd'hui, avec la mise en place de la nouvelle nomenclature de master, un parcours dans une mention BEE (BEE =

⁸ R. Vignes-Lebbe est membre de l'UMR 7205 Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB, MNHN/CNRS/SU/École pratique des hautes études/Université des Antilles.

⁹ ECIRE : écologie de la conservation, ingénierie écologique, recherche et expertise, EEF : écologie fonctionnelle et évolutive

Biodiversité, Ecologie, Evolution). Certaines parties ont changé un petit peu d'affectation. Par exemple nous avons dans la spécialité une orientation expertise faune-flore qui se trouve rattachée maintenant à la partie écologie de BEE, en particulier la conservation et l'ingénierie écologique. Nous avons aussi des parcours internationaux qui attirent des étudiants sur la biodiversité et les écosystèmes végétaux tropicaux, et ces étudiants peuvent être des écologues ou des systématiciens. Les étudiants SEP sont inscrits soit au Muséum soit à SU.

Depuis la mise en place de la nouvelle nomenclature, SEP est donc un parcours dans la mention Biodiversité, écologie et évolution. Cette mention existe au Muséum et à SU : c'est une formation conjointe qui accueille de façon assez équilibrée les étudiants des deux côtés. Pour chaque promotion, en M1 comme en M2, on a à peu près une quarantaine d'étudiants. Le contrat pédagogique de chacun est construit à partir des UE de l'offre de formation SEP, mais peut cependant inclure quelques UE venant d'autres parcours. C'est important d'ouvrir le parcours et de ne pas le restreindre. Concernant les objectifs, c'est une formation à la recherche sur la systématique, l'évolution et la paléontologie. Cette formation est vraiment centrée sur les concepts et les méthodes autour de l'évolution, avec une place importante sur les méthodes phylogénétiques, de la cladistique à la phylogénie moléculaire, sur l'anatomie comparée. On a également une UE sur la lecture de L'Origine des espèces faite par Pierre-Henri Gouyon ; en effet beaucoup d'étudiants n'ont pas lu cet ouvrage et c'est donc l'occasion de leur faire lire et d'avoir une discussion à partir de leur lecture. Le Master prépare aussi à des aspects plus appliqués sur les collectes, les inventaires, l'analyse des données, et l'informatisation des données de biodiversité.

L'implication du Muséum dans cette formation, en temps de service, représente, d'après les calculs du dernier bilan fait pour l'HCERES, 1031 heures par an pour le M1 et le M2. Le Muséum est le plus gros contributeur, avec 40% des heures et 80 personnes impliquées, dont beaucoup n'interviennent que ponctuellement. Je compte aussi des personnels de l'UMS Patrinat qui ne sont pas forcément Muséum. Certains interviennent pour une heure ou deux, d'autres beaucoup plus. Si on regarde la répartition des heures selon les personnels du Muséum (figure 3), on s'aperçoit que les plus gros contributeurs sont les maîtres de conférences pour près de 700 heures, suivi des professeurs (200), les doctorants (50), les ingénieurs d'étude, les postdocs, les ingénieurs de recherche, les ATER, les techniciens et les autres personnels.

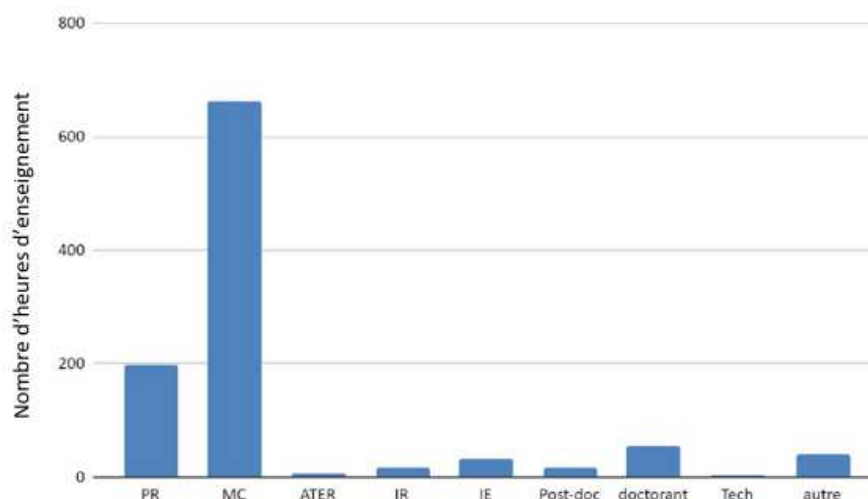


Fig. 3. Implication en nombre d'heures d'enseignement des personnels du Muséum dans le master SEP (PR : professeur(e)s ; MC : maîtres de conférences ; ATER : attaché(e) temporaire d'enseignement et de recherche ; IR : ingénieur(e) de recherche ; IE : ingénieur(e) d'étude, Post-doc : post-doctorant(e), Tech : technicien(ne) © Régine Vignes-Lebbe

Concernant l'utilisation des ressources du Muséum dans le cadre de cette formation SEP, la première est le lieu où l'on passe tous les jours, c'est-à-dire le Jardin des plantes. On utilise le jardin écologique dès le début du master 1 pour amener les étudiants à un atelier qui leur permet de voir un travail de systématique depuis la collecte sur le terrain jusqu'à l'analyse phylogénétique. En tout début d'année, on les fait pour cela travailler en mode projet en petits groupes afin qu'ils voient à la fois les méthodes de collecte et aussi comment, à partir de ces données collectées, on va chercher de l'information, comment on va pouvoir trouver des données même si la nomenclature a changé, comment on va identifier, comment on va chercher des séquences qui vont nous servir pour faire de la reconstruction phylogénétique, etc. Les collections, les serres ou les galeries sont d'autres ressources largement utilisées dans de nombreuses UE : du matériel pédagogique est utilisé et des visites sont organisées. On peut prendre l'exemple du déroulement d'un TD qui se passe dans la galerie de paléontologie et qui a été monté il y a quelques années par Bouziane Khalloufi¹⁰ un de nos anciens étudiants alors ATER. Il s'agit d'un atelier sur l'identification en paléontologie. Là les étudiants ont du matériel pédagogique ou des moulages mis à leur disposition dans l'amphi de paléonto. Généralement, ça se passe le jour où la galerie est fermée. Ils ont aussi accès à du matériel qui est exposé, par exemple un fémur de mastodonte qui est au premier étage dans la galerie. L'étiquette est cachée et les étudiants sont amenés à

¹⁰ B. Khalloufi a fait une thèse au Muséum intitulée Révision de l'ichthyofaune du crétacé supérieur du Jbel Tselfat, Maroc, sous la direction d'Hervé Lelièvre et René Zaragüeta Bagils.

avoir une réflexion d'anatomie comparée pour pouvoir ré-identifier et expliquer leur démarche d'identification. Ils vont dans la galerie pour faire ce travail d'anatomie comparée. Cela leur permet en plus de travailler sur du matériel historique qui a été étudié avant eux, pour ce fémur de mastodonte, par Buffon, Daubenton ou par Cuvier. Cet atelier a aussi une dimension intéressante sur l'histoire de la discipline. D'autres ressources du Muséum sont utilisées comme les stations, le parc de la Haute Touche, soit pour des UE soit pour l'accueil de stagiaires. Une autre particularité du Muséum, ce sont les événements qui s'y passent comme la fête de la science. Je prends cet exemple parce que de nombreux étudiants y participent : les ateliers de moulages mobilisent toujours beaucoup d'étudiants en paléontologie. Pour l'atelier d'identification, les étudiants ont fait des moulages d'empreintes des carnivores que l'on peut trouver en France à partir d'animaux conservés au Muséum. Les étudiants animent cet atelier et sont extrêmement intéressés par cette dimension de transmission des savoirs. Je pense que la médiation scientifique pourrait peut-être, au travers des différents parcours du Master du Muséum, être un élément à développer. Je trouve que ce serait une expérience très intéressante pour les étudiants.

Le Muséum apporte aussi des compétences qui lui sont un peu spécifiques. Une UE de dessin scientifique est proposée aux étudiants depuis longtemps. Elle avait été montée initialement par Dominique Visset qui était dessinatrice à l'UPMC mais elle est assurée maintenant en grande partie par du personnel Muséum. On a aussi une UE de morphométrie ; c'est quelque chose d'important dans les études de taxonomie intégrative actuelle. Le Muséum dispose aussi de compétences en imagerie, et reconstruction 3D. Ces méthodes ont beaucoup évolué. Aussi, petit à petit, une place plus importante a été faite à l'acquisition des données et à l'imagerie dès le M1. Un autre aspect important est l'implication des unités du Muséum dans l'encadrement de nos étudiants de M1 ou M2. Les cinq UMR qui accueillent le plus nos étudiants sont le CR2P, l'ISYEB, MECADEV, BOREA et le CESCO. Cela représente environ 80% des encadrements mais n'implique pas nécessairement comme encadrants des personnels Muséum au sein de ces unités bien sûr.

Voici maintenant quelques exemples de sujets de stage de recherche pour montrer la diversité des thématiques :

- étude phylogénétique morphologique des crocodiliens avec des datations utilisant le registre fossile ;
- phylogénie et calibration moléculaire des insectes Hémiptères, les Fulgoroidea ;

- l'histoire évolutive des musaraignes ;
- délimitation des espèces et système de reproduction ;
- taxonomie intégrative sur un genre, *Microphis*.

Il y a donc beaucoup de sujets de master qui tournent autour des analyses phylogénétiques, de la délimitation d'espèces, de la métagénomique. Il y a également des aspects plus conceptuels et des sujets plus méthodologiques et théoriques, par exemple le sujet : homologie, caractères, tests, des sous arbres aux super arbres. Par ailleurs, je me suis amusée à faire un nuage de points avec les titres de stages de M2 en 2019 pour voir les mots qui ressortent. On voit que phylogénie et diversité émergent alors que les mots-clés fournis par les étudiants sont évolution, biogéographie, métabarcoding, taxonomie intégrative, des éléments qu'on ne voyait pas forcément dans les titres des sujets de master. Il serait peut-être intéressant de faire ces nuages de points sur tous les sujets de master depuis 10 ans pour voir l'évolution des thématiques qui ressortent le plus au fil des années. Je l'ai fait aussi sur les titres de stages de M1 de 2019 où cette fois c'est l'identification qui domine. Mais ce sont des stages courts. On ne peut pas demander le même type d'étude sur un stage qui ne dure que deux mois.

Nous avons vu que certaines UMR MNHN encadrent beaucoup d'étudiants. Est-ce qu'il y a aussi un avenir pour nos étudiants au Muséum ? Je suis allée regarder les organigrammes sur les sites web des UMR qui accueillent le plus nos étudiants. Onze doctorants sur 21 au CR2P sont issus de la formation SEP. On a également trois maîtres de conférences, un ingénieur de recherche et deux ingénieurs d'études. Neuf doctorants sur 40 à l'ISYEB viennent de SEP, ainsi qu'un maître de conférences et un ATER. Nous avons également des doctorants à MECADEV, à BOREA et au CESCO. Deux UMS participent parfois à l'encadrement de nos étudiants, Patrinat et Bbees. Patrinat est une UMS importante en terme de débouchés post master, puisque l'on y trouve aujourd'hui sept chargés de mission ou responsables de projet qui sont issus de notre formation SEP.

L'attractivité du Muséum pour les étudiants qui viennent en master SEP est évidente et apparaît très clairement dans les lettres de candidatures. Il y a eu aussi beaucoup d'amélioration dans les conditions d'accueil des étudiants avec des salles dédiées, des lieux de rendez-vous. On a parlé dans cette journée de l'UE AFFRODIT mais il y a une autre UE en ligne qui est en cours de création, c'est l'UE Insect.

Le master SEP a des points positifs et négatifs bien sûr. Le master est maintenant renommé et bien positionné aux niveaux national et international. Le fait qu'il soit rattaché au Muséum est un atout, et attire. Le master SEP est ouvert dans le sens où beaucoup de nos étudiants vont suivre quelques unités d'enseignement dans d'autres parcours qui peuvent concerner l'écologie (ECIRE et EEF), la muséologie, les collections, ou l'archéologie. C'est un enrichissement qui permet aux étudiants d'avoir une coloration individuelle autour de leur thématique commune de Systématique, Evolution, Paléontologie. Par contre, l'inverse n'est pas vrai. Pour quelles raisons ? Je ne sais pas mais il est très rare que des étudiants d'autres parcours viennent suivre des UE SEP.

Un dernier point est que cette formation a une solidité liée au fait d'associer deux établissements, le Muséum et SU. Or aujourd'hui, il y a une tendance à la divergence entre les établissements. Je m'explique : depuis toujours il y avait au sein du master une différence lors du premier semestre sur la partie tronc commun d'établissement entre UPMC (à l'époque) et le Muséum, mais cette différence était modérée. Cette différence s'est fortement accrue avec la réorganisation des masters pour la nouvelle nomenclature. Concrètement sur les 30ects de semestre 1 en 2010 un étudiant SEP, qu'il soit inscrit au Muséum ou à l'UPMC, avait 18 à 21 ECTS¹¹ en commun avec ses camarades de l'établissement partenaire (12 ECTS d'enseignement totalement fait ensemble; 6 ECTS du même enseignement mais fait séparément dans chaque établissement concernant l'anglais et les stat ; et 3 ECTS d'anatomie comparée obligatoire au Muséum ou 3 ects sur la Diversité des génomes, ces 2 UE pouvant être suivies en optionnel à l'UPMC). Aujourd'hui les étudiants SEP inscrits au Muséum n'ont que 15 ECTS de formation commune en S1 avec leurs camarades de SU (9 ECTS d'enseignement totalement fait ensemble; 6 ECTS du même enseignement mais fait séparément dans chaque établissement concernant toujours l'anglais et les stat ; les UE MNHN d'anatomie comparée ou de Diversité des génomes ne sont plus compatibles avec les plannings SU). Et en plus les étudiants SU ont 6 ECTS obligatoires en S2 ce qui leur laisse moins de choix d'UE possible lors de ce second semestre, ce qui est une frustration par rapport à leurs camarades du Muséum. Sur le plan des contenus des troncs communs d'établissement, celui du Muséum est plus centré sur la biodiversité, l'évolution, les collections, l'épistémologie... tandis que celui du côté SU se veut une ouverture large sur les problématiques environnementales et du coup les étudiants travaillent des thématiques très diverses (de l'écophysiologie à la géologie), ce qui rend le tronc commun de SU plus lourd et

¹¹ ECTS = european credit transfer system ou système européen de transfert de crédits. Chaque crédit représente un certain nombre d'heures de cours. L'ECTS a été instauré en 1989 dans le cadre du programme Erasmus.

difficile pour les étudiants qui aspirent en arrivant en master SEP à se spécialiser en Systématique. Nous nous inquiétons de l'écart que cela creuse entre les étudiants en début de master, au lieu de souder l'ensemble de la promotion. J'espère que nous pourrions continuer de faire marche arrière pour diminuer cette divergence tant quantitativement, que qualitativement et sur le plan de l'organisation des plannings.

Je pense qu'il faut absolument être vigilant et défendre la cohésion SU-MNHN de cette formation. Enfin il faut faire évoluer les contenus parce que la façon de travailler en recherche évolue, ainsi que les méthodes, les concepts. Dans cette salle d'entomologie, dans quelques mois, il y aura les journées de la Société Française de Systématique qui porteront sur « enseigner la systématique aujourd'hui et demain »¹².

3. Former les enseignants du primaire et du secondaire à l'enseignement de l'évolution par *Emilie Détouillon*¹³, DIREF

J'ai décidé de vous présenter d'abord le pôle de formation des enseignants que je coordonne puis parler de l'évolution dans les programmes scolaires, ce qui est notre ligne directrice pour toutes les formations que nous proposons aux enseignants. Ensuite, j'exposerai ce que nous faisons *in situ*, sur les sites du Muséum, pour les enseignants du premier et du second degré et les formations complémentaires proposées en ligne pour élargir notre public et aussi des ateliers pour les classes. Nous touchons donc non seulement les enseignants mais également les élèves.

Au sein de la direction de l'enseignement au Muséum, le pôle formation regroupe une dizaine d'enseignants dont deux à plein temps et huit professeurs relais. Ces derniers sont des enseignants du second degré en charge complète d'enseignement dans leur établissement scolaire (collège ou lycée) qui travaillent, en plus, une journée par semaine au Muséum pour préparer des formations pour les enseignants du premier et du second degré. On accueille environ 2 000 enseignants chaque année en stage et 140 classes sur l'ensemble des événements que nous organisons et qui, pour une grande partie, sont animés par des chercheurs du Muséum (fête de la science, les rendez-vous de la science et des projets à la

¹² En raison des événements sanitaires covid, ces journées ont dû être reportées.

¹³ E. Détouillon est enseignante agrégée de science de la vie - science de la Terre et de l'Univers - Responsable du pôle formation enseignants du second degré à la Direction de l'Enseignement et de la Formation (DIREF) / Direction générale déléguée à la recherche, l'expertise, la valorisation et l'enseignement-formation (DGD REVE)

carte dits « classes Muséum »). Nos missions principales consistent à mettre en œuvre des actions de formation initiale et continue disciplinaire et interdisciplinaire qui s'appuient sur les savoir-faire et les compétences du Muséum et qui suivent les programmes scolaires. Des ressources pédagogiques sont également mises à disposition des enseignants. Je vous montrerai des exemples de ressources en lien avec l'évolution. Nous sommes également amenés à organiser des actions, en particulier celles qui vont mettre les classes en lien avec les chercheurs du Muséum. Nous diffusons des informations auprès du public scolaire et, au sein du Muséum, on essaie d'assurer une expertise pédagogique auprès des équipes qui en auraient besoin (pour les expositions ou les actions de médiation). On peut proposer des liens vers les programmes scolaires, réagir sur la manière dont ces sujets sont abordés dans ces différents domaines.

Avant de présenter les formations en détail, je voulais vous montrer comment l'évolution est abordée dans les programmes scolaires. A l'école primaire, le terme n'apparaît pas du tout mais on amène les élèves de maternelle à explorer le monde vivant, appréhender le vivant et le non-vivant, le cycle de vie des animaux. Au cycle 2, on va commencer à observer les interactions entre les animaux et les végétaux et la diversité du vivant. Au cycle 3, à cheval entre le primaire (CM1-CM2) et le collège (6^e), on va classer cette diversité et essayer de construire des liens de parenté entre les différentes espèces observées pour expliquer l'évolution des organismes. Le terme évolution est alors cité mais il n'est pas explicité beaucoup plus. En cycle 4, de la 5^e à la 3^e, on va tenter d'inclure le temps dans cette réflexion avec l'histoire des sciences (comment les théories se construisent) et également avec l'apparition et la disparition des espèces. On va commencer à parler des mécanismes de l'évolution (hasard, sélection naturelle). Au lycée, on va un peu plus loin sur la thématique de la variation en expliquant cette variation par la diversité des allèles et on continue sur les mécanismes en parlant de dérive génétique, de spéciation, et on amène les élèves à réfléchir à l'échelle de la population et non plus uniquement des individus. Dès la seconde, on travaille sur la démarche scientifique pour montrer comment une théorie scientifique et le savoir se construisent. En première, on complète la partie diversité allélique et la variation par le mécanisme des mutations. Apparaissent des données sur l'évolution humaine, sur les applications de l'évolution dans le domaine médical. C'est vraiment en classe de terminale qu'on va présenter l'évolution comme une grille de lecture du monde pour expliquer certaines structures anatomiques, des raisonnements dans le domaine médical mais également celui de l'agriculture (domestication des plantes, utilisation de pesticides...). On va plus loin en

utilisant des modèles mathématiques dans l'enseignement scientifique (qui regroupe maintenant les mathématiques, la physique et les SVT) pour lier les disciplines et montrer comment les mathématiques peuvent aider à comprendre les phénomènes. En terminale, on complète ce qui a été abordé depuis la seconde sur la diversité pour comprendre les mécanismes à l'œuvre (génétiques mais pas uniquement).

C'est donc le cadre dans lequel les formations proposées par le Muséum se placent (figure 4), en essayant de donner des clés pour enseigner ce programme. A chaque fois que l'on organise une formation, on essaie d'abord d'aider les enseignants à approfondir leurs connaissances des enseignants ou de les réactualiser surtout lors des changements de programmes (auxquels ils n'ont donc pas forcément été formés dans leur cursus). A cette occasion, nous travaillons avec les enseignants-chercheurs du Muséum que nous sollicitons pour intervenir dans ces stages et apporter du contenu scientifique. Ensuite, on complète cet apport de connaissances par des choses pratiques : des visites, des pistes d'activités qu'ils peuvent mettre en place dans leur classe, des échanges et des ateliers de réflexion sur la pratique des enseignants. Nous touchons donc plusieurs publics et, sur le thème de l'évolution, surtout des enseignants de SVT (soit des formations proposées via le rectorat, soit des cycles de conférences sur leur temps libre) et la formation initiale (Master MEEF) des enseignants (journées thématiques autour de la biodiversité ou de la lignée humaine par exemple, pour les Masters de Sorbonne-Université et Paris-Diderot). Nous touchons également un public interdisciplinaire dans le cadre des stages d'ouverture culturelle.

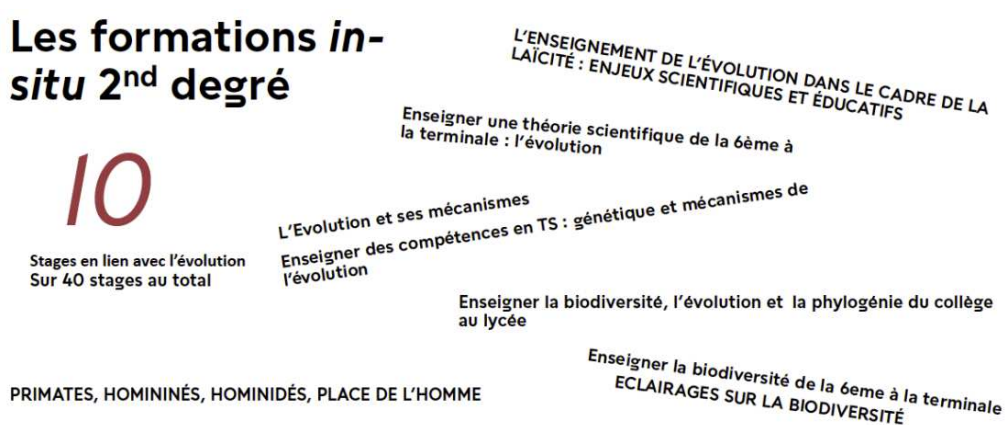


Fig. 4. Formations proposées par le Muséum pour les enseignants du premier et du second degré : 10 stages en lien avec l'évolution, sur 40 stages au total, © Emilie Détouillon

Un quart des stages aborde la thématique de l'évolution au sens large et selon les attendus des programmes scolaires. Mais d'autres sont plutôt en lien avec la théorie scientifique en elle-même, comme cette année par exemple : « l'enseignement de l'évolution dans le cadre de la laïcité ». Il y a aussi « les mécanismes de l'évolution », « la biodiversité », « l'évolution de l'homme », sur les applications (les résistances aux maladies) et les stages d'ouverture culturelle (toutes disciplines, sur la méthodologie de la science) comme « science et croyance, formation de l'esprit critique » pour montrer comment se construit le savoir scientifique. L'évolution peut être un sujet traité quand les stagiaires viennent au Muséum (visite par exemple dans les galeries avec un petit sujet de classification). En effet, ces stages étant construits avec d'autres structures, chacune y enseigne sa thématique phare.

Pour être plus précise, je vous présente le programme d'un stage qui a eu lieu sur trois jours au mois de janvier 2020 pour les enseignants de collège et de lycée de l'Académie de Créteil. Le premier jour ont eu lieu des conférences (par exemple celle d'Evelyne Heyer sur l'évolution humaine) qui donnent aux enseignants des clés pour leur enseignement de première et de terminale. Des visites guidées (Musée de l'Homme) sont également prévues pour permettre aux enseignants de voir comment aborder concrètement les notions développées dans les conférences. Le deuxième jour est consacré à une conférence de Marc-André Selosse sur la la partie évolution/interactions, ainsi qu'à des visites guidées (visite sur la démarche de Darwin dans la GGE ou exploitation des Grandes Serres en lien avec la vie fixée des plantes ou des ateliers de classification avec une matrice taxons-caractères à remplir en galerie d'anatomie comparée pour aboutir ensuite à des groupes emboîtés et éventuellement une phylogénie). Le dernier jour du stage, on essaie de dédier une demi-journée à un atelier de production de ressources pour que les enseignants qui ont vu beaucoup de choses différentes pendant le stage puissent repartir avec du concret et des activités qu'ils vont pouvoir mettre en place directement dans leur classe au retour. Les enseignants sont par petits groupes de deux ou trois pour préparer une séance/une fiche d'activités pour les élèves. On les laisse travailler 1h-1h30 avant d'ouvrir, pour une mise en commun entre tous les participants, une séance d'échanges riches. Les professeurs relais qui travaillent avec moi préparent souvent en amont des idées d'activité pour initier ces séances. On organise aussi des ateliers comme celui qu'on a animé un certain nombre de fois dans nos stages, celui sur l'analyse critique des représentations de l'évolution. C'est bien de donner aux enseignants des ressources et des idées d'ateliers pour enseigner l'évolution mais il faut également leur proposer des arguments pour répondre aux questions de certains élèves ou corriger des élèves

qui auraient une conception erronée de l'évolution (véhiculée par les médias, Internet, voire même, il y a quelque temps, dans les manuels scolaires). Cet atelier comprend une première partie pendant laquelle on analyse une série de représentations (évolution linéaire, notion de progrès...). Ensuite, on propose aux enseignants, toujours par petits groupes, des démarches pour déconstruire cette vision linéaire. On peut demander à l'élève pourquoi la représentation n'est pas valide ou chercher dans un extrait d'article ce qui n'est pas correct. L'idée étant de discuter et de donner des clés pour passer ces difficultés.

Dans toutes les formations dont je viens de parler, nous touchons les enseignants des académies de Paris, Créteil et Versailles. Il y a des enseignants-chercheurs qui interviennent au-delà de ces formations, contactés par les inspecteurs d'académie ou d'autres formateurs en France. De notre côté, dans le pôle de formation des enseignants, pour toucher plus de public, nous mettons des ressources en ligne (edu.mnhn.fr). Elles sont accessibles librement et gratuites. Elles ont été élaborées par les enseignants-chercheurs du Muséum et sont variées (synthèse, approfondissement, conférences filmées, animations flash, pistes d'ateliers et de visites, activités clés en main). Sur le sujet de l'évolution, des modules sont disponibles (un pour le primaire et deux pour le second degré) comprenant de nombreux articles auxquels on peut accéder. Par exemple : sur l'histoire de la pensée évolutionniste avec une frise chronologique qui se déroule et les textes historiques à télécharger ; sur les conceptions des élèves sur l'évolution du vivant (schémas, capsules vidéo...) ; sur les différents sens du mot évolution (écrit par Guillaume Lecoindre) ; sur les créationnistes. Ce à quoi s'ajoutent des activités pratiques (contenu téléchargeable, animation flash, « visite virtuelle » par exemple de la galerie de paléontologie, accès aux spécimens pour observer les différents caractères, remplir la matrice...). Il y a d'autres modules en lien avec l'évolution : la biodiversité (évolution dans le temps), l'évolution humaine (encore en construction), les symbioses (interactions entre les êtres vivants).

Enfin, nous organisons des ateliers pour les classes animés par des doctorants et des enseignants-chercheurs pour faire le lien entre la recherche et les programmes scolaires. Ce qui est important c'est que les élèves manipulent et découvrent les métiers de la recherche. Les « ateliers RDV de la science » sont construits sur le même principe que la fête de la science. Ils ont lieu de janvier à juin. On y reprend des éléments déjà proposés aux enseignants dans nos stages (exemple de l'atelier de classification en galerie d'anatomie comparée pour des classes de 3^e et de 2nde avec une étape en salle puis en galerie). Il y a un

atelier équivalent avec les plantes du jardin et des ateliers sur la méthodologie et l'histoire des sciences : « esprit critique » (visite en Galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée), « homme penseur et acteur de la biodiversité et de l'évolution » (visite en Grande Galerie de l'Evolution, et découverte des statues des grands scientifiques du Muséum dans le jardin).

4. Le rôle des publications scientifiques dans la diffusion des connaissances sur l'Evolution par Laurence Bénichou¹⁴, Cheffe de service aux Publications scientifiques, et Tony Robillard¹⁵, Maître de conférences

Laurence Bénichou.- Le Muséum a une très longue tradition d'édition scientifique depuis 1802, mais la création du service des éditions scientifiques ne remonte qu'à 1995. Aujourd'hui nous sommes 13 équivalents temps plein dans le service, tous ITRF (ingénieurs et techniciens de recherche et de formation), majoritairement de la BAP F¹⁶. Nous travaillons en étroite collaboration avec une vingtaine de chercheurs de l'établissement qui sont rédacteurs en chef des différentes collections et revues. Je vais montrer ce que nous faisons, ce que nous publions, puis je laisserai la parole à Tony pour parler de la partie évolution.

En 1802 et aujourd'hui, nous n'avons cessé de développer d'enrichir le service et l'offre d'édition scientifique de l'établissement. En 2000, nous étions le premier établissement à mettre en ligne dès leur parution tous les articles publiés par le service des publications scientifiques, gratuitement (pour les lecteurs comme pour les auteurs). C'était les prémisses de l'Open Access. En 2019, nous avons lancé deux grosses opérations. La production en XML¹⁷ des articles pour permettre la libération des données contenues dans les articles dès leur parution et la mise en ligne des différentes collections d'ouvrages qui sont désormais disponibles sur la plateforme OpenEdition Books¹⁸. En 2020, nous travaillons à rendre accessibles gratuitement les publications en version numérique, y compris les monographies, que jusqu'alors nous vendions uniquement en format papier. C'est la mise en place d'un

¹⁴ L. Bénichou est responsable d'édition aux Publications scientifiques du Muséum et cheffe du service.

¹⁵ T. Robillard est responsable scientifique aux Publications scientifiques et membre de l'UMR 7205 Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB, MNHN/CNRS/SU/École pratique des hautes études/Université des Antilles.

¹⁶ La Branche d'Activité Professionnelle F (BAP F) couvre les domaines de la culture, de la communication, de la production et de la diffusion des savoirs.

¹⁷ XML = langage informatique de balisage

¹⁸ OpenEdition Books est une plateforme d'édition numérique d'ouvrages en sciences humaines et sociales lancée par OpenEdition (centre pour l'édition électronique ouverte) lancé par le CNRS, l'université Aix-Marseille, l'école des hautes études en sciences sociales, l'université d'Avignon, la Bibliothèque scientifique numérique et l'Agence nationale de la recherche.

nouveau modèle économique alliant accès libre sur OpenEdition et recettes pour les version print, comme nous l'avons déjà fait d'une certaine façon pour les périodiques, alliant open access et royalties.

La ligne éditoriale de l'établissement est simple : les publications scientifiques du Muséum publient des résultats scientifiques originaux dans les domaines de compétences de la maison, de l'anthropologie à la zoologie, notamment ceux qui valorisent les collections. Les publications comprennent aujourd'hui dix périodiques et neuf collections d'ouvrages. Nous avons plus de 1500 titres à notre catalogue puisque nous sommes les héritiers, comme je le disais, d'une longue tradition depuis 1802. Nous avons des ouvrages imprimés dans les années 1910, 1920, 1930, 1940 toujours en vente au service. On a un superbe site que je vous invite à aller regarder à l'adresse sciencepress.mnhn.fr qui permet une vente en ligne en plus de l'accès aux articles publiés. Parmi les dix périodiques, que vous connaissez j'imagine, une grande partie est dédiée à la taxonomie.

Je vous ai présenté ce que nous publions. Maintenant, j'aimerais prendre un petit plus de temps pour vous dire comment on travaille. Au service des publications scientifiques, on essaie de séparer la forme et le fond, sachant que la forme est au service du fond et que le fond ne s'exprime que par la forme. Ainsi, le service est sous la double responsabilité, administrative assurée par moi-même, cheffe de service, et sous la responsabilité scientifique de Tony qui vous parlera un peu plus tard de la partie évolution. Je m'occupe de tout ce qui relève du budget et du personnel et Tony est garant scientifique de ce que l'on publie. Ça veut dire que l'on travaille ensemble. Pour autant, on essaie d'avoir chacun nos compétences et nos expertises. Je ne suis pas une scientifique, en tout cas pas dans la BAP A, je suis bien de la BAP F, pardon pour le jargon administratif.

Toutes les rédactions sont ainsi composées d'un éditeur scientifique BAP F responsable de la forme et d'un rédacteur en chef responsable du fond (figure 5). C'est vrai pour toutes les collections, toutes les revues, dans toute l'édition scientifique au Muséum et ailleurs. Dans le processus habituel d'évaluation, commence la lecture des referees, puis les allers-retours avec l'auteur. Celui-ci soumet sa version révisée, qu'on finit par accepter ou refuser. Si elle est refusée, le travail s'arrête là. Si elle est acceptée, on commence la préparation avec un gros travail de production fait par l'éditeur technique qui va, après avoir géré le processus d'évaluation par les pairs, s'occuper de la vérification de la qualité technique, et enrichir le

manuscrit du point de vue de sa structure et de sa forme. En taxonomie, qui est une discipline beaucoup plus structurée que d'autres dans la forme, c'est excessivement important parce que la façon dont on décrit les choses ou la façon dont on structure un texte va déterminer ce que ce texte dit, pour un humain mais aussi surtout aujourd'hui, pour une machine. La difficulté pour nous est de faire des textes qui peuvent être lisibles autant par une personne que par un algorithme.

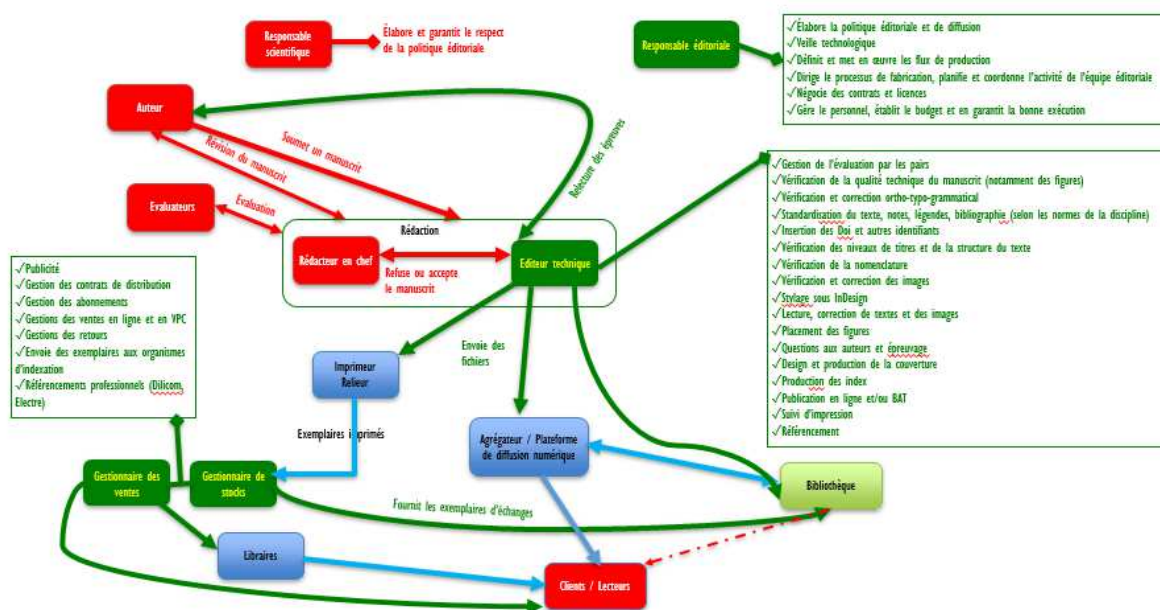


Fig. 5. Publications scientifiques du Muséum : le processus d'un article ou manuscrit entre sa soumission et sa parution © Laurence Bénichou

La figure 5 rassemble tous les métiers du service. En rouge sont signalés les acteurs scientifiques, en vert ceux spécialisés dans l'édition scientifique (la BAP F) et en bleu les prestataires extérieurs. La bibliothèque est en vert parce qu'elle fait partie de la maison mais pas du service. On peut synthétiser ce schéma par une boucle. Vous voyez que les scientifiques interviennent en début de chaîne, avec les auteurs et les referees, et puis à nouveau en fin de chaîne car nos lecteurs, nos acheteurs sont les scientifiques. Le chercheur prend tour à tour une casquette d'auteur, de relecteur, de rédacteur et de lecteur. C'est très important pour comprendre ce qu'on appelle l'Open Access et les raisons fondamentales sous-jacentes.

Tout le monde est familier avec l'Open Access mais je vais redire de quoi il s'agit et parler d'un mouvement qui commence à beaucoup s'étoffer, le Fair¹⁹ Open Access. Dans « fair » il y a une donnée en plus, c'est le « i » d'interopérabilité qu'on ne va pas retrouver dans l'Open Access. Vous pouvez avoir un texte en Open Access qui est accessible pour tout le monde mais pas forcément interopérable. L'Open Access c'est permettre un accès *illimité* à des documents électroniques en donnant à l'utilisateur le *droit à un accès gratuit, irrévocable et universel*, c'est-à-dire *sans barrière financière, légale ou technique*. C'est la définition suprême de l'Open Access, dans le monde entier : *ni barrière financière, ni barrière légale, ni barrière technique*. Mais ça ne veut pas dire que c'est gratuit pour tout le monde. C'est gratuit pour le lecteur, mais pas forcément pour l'auteur. Une petite nuance qu'il faut bien comprendre. Avant, c'était le lecteur qui payait pour lire. Aujourd'hui c'est l'auteur, souvent, qui paie pour donner à lire. C'est ce qu'on appelle dans le jargon, les APC (Article Processing Charge). Ce sont les coûts de production payés par l'auteur pour que son article soit mis en Open Access. On parle aussi beaucoup « d'embargo », c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le moment où un article est publié et le moment où il est autorisé à être en Open Access. Pendant la première année en SHS (Sciences Humaines et Sociales) et six mois en STM (Science, Technologie et Médecine), l'article ne pourra pas être lu librement, puisqu'il est sous embargo, donc ne pourra être mis en Open Access.

Plusieurs couleurs dans l'Open Access sont essentielles à la compréhension des modèles économiques mis en place :

- on parle de voie verte (Open Access green) quand il s'agit d'archives ouvertes comme HAL. Dans ce cas, c'est l'auteur qui décide de déposer son article, son manuscrit, son mémoire, dans un dépôt institutionnel en archive ouverte. Il y a une difficulté ici de mon point de vue parce que HAL brouille les pistes entre ce qui relève de la littérature grise et ce qui relève de la littérature publiée. Les éditions scientifiques ne sont pas seulement le fait de porter à la connaissance mais aussi d'avoir certifié l'information, ce qui n'est pas le cas dans la littérature grise. Je ne dis pas qu'il ne faut pas de littérature grise. Je ne dis pas qu'il ne faut pas qu'elle soit déposée en archives ouvertes. Je dis simplement qu'il faut bien faire la part des choses entre un article qui a été reviewé par une revue, accepté puis publié et un papier qu'on a placé dans un dépôt institutionnel en archive ouverte, donc en vert.

- Dans la voie dorée (Gold Open Access), c'est l'éditeur qui met la version finale définitive, acceptée par les pairs, revue par l'auteur et publiée, en Open Access. C'est à

¹⁹ Findable Accessible Interoperable Reusable : Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable

l'initiative de l'éditeur donc, quel qu'il soit, de mettre l'article en ligne en accès libre. C'est généralement là que les éditeurs commerciaux demandent aux l'auteur de couvrir les coûts de production.

- Et puis il y a une voie plus chic que l'or, c'est le diamant. La voie diamant (Diamond open access) est la mise à disposition de l'article par l'éditeur, comme en voie dorée, mais c'est fois-ci gratuitement pour le lecteur, mais aussi pour l'auteur. Ce qui veut dire que les coûts de production sont portés par l'éditeur. C'est lui qui va payer les coût de production. En général, ce sont des institutions comme le Muséum qui font de l'Open Access diamant. C'est le cas ici puisque nous sommes un service du Muséum, payé par le Muséum, et nous ne faisons payer ni nos auteurs, ni nos lecteurs. Tous les articles sont en Open Access diamant.

Comment passe-t-on de l'Open Access au fair Open Access ? Autrement dit, comment faire pour que les articles en Open Access soient accessibles à toutes les bases de données et soient sémantiquement enrichis ? C'est un processus beaucoup plus compliqué que de poster un PDF en ligne et le rendre accessible. Un journal un peu plus spécial que les autres, *European Journal of Taxonomy (EJT)*, nous sert de laboratoire. C'est un journal qui appartient au Muséum mais aussi à neuf autres institutions en Europe. Ce journal nous sert beaucoup pour développer des nouvelles technologies et les mettre à disposition des autres revues par la suite. On a donc commencé par *EJT* mais on va le faire pour les autres revues du Muséum. *EJT* est en Open Access parce que les pdf sont sur le site. Mais pour passer de l'Open Access au Fair, il faut libérer les données contenues dans le pdf. Cela veut dire qu'il faut aller chercher à l'intérieur des articles les images, tableaux, traitements, informations sur les spécimens ou sur les traitements taxonomiques pour les transférer dans différentes bases de données. Pour faire ce travail-là, on commence par le pdf parce qu'en taxonomie les codes de nomenclature recommandent encore la version pdf/A²⁰ comme étant la plus stable, même si d'un point de vue technique ce n'est pas vrai²¹. On démarre du pdf et on extrait les données. Pour cela on travaille avec Plazi, association suisse à but non lucratif spécialisée dans l'Xmilation²² des données taxonomiques et qui permet de transférer toutes les données dans le GBIF²³ ou toute autre base qui pourrait être intéressée. Ce qui signifie que l'on a structuré le texte avant même qu'il ne soit publié. Par exemple prenez un article d'*EJT*. Dès qu'il est publié, il est versé directement dans Plazi où les informations contenues dans l'article, comme

²⁰ Le pdf/A ou pdf Archive est un format prévu pour l'archivage à long terme.

²¹ Le format réputé le plus stable est désormais le fichier XML

²² codage d'un document au format XML

²³ Voir la vidéo et le texte de la présentation d'Anne-Sophie Archambeau « Le Muséum au sein du GBIF » au cours de la journée scientifique 2016 sur le rayonnement du Muséum : secmuseum.sitego.fr/

le traitement taxonomique lui-même, le matériel cité, la répartition géographique des specimens collectés, sont extraites de l'article et transférées. Depuis Plazi, les informations sur chaque traitement taxonomique sont liées à Zoobank pour les animaux ou IPNI (International *Plant names Index*) quand il s'agit de plantes. Sur la base de Plazi on peut voir la synthèse des informations taxonomiques par traitement, la géolocalisation des spécimens collectés apparaît sur une carte. L'article est également déposé dans une archive Zenodo²⁴ gérée par le CERN en Suisse ainsi que les figures de l'article extraites et auxquelles on va donner un ensemble d'identifiants. Toutes les informations contenues dans l'article vont ainsi être liées à des identifiants et avoir des DOI²⁵. On met aussi des DOI aux figures, aux traitements taxonomiques eux-mêmes à l'intérieur des articles de façon à pouvoir les lier les uns aux autres. Enfin, tout est déversé dans le GBIF. Le processus entre le moment où l'article est mis en ligne en pdf et où il est déversé prend vingt-quatre heures. Dès qu'un article est publié, toutes les données contenues dans cet article sont ainsi déversées dans toutes les bases de données possibles et imaginables. Qui veut les prendre, les prend et les cite comme il l'entend. L'objectif ultime est de permettre de lier l'information contenue dans les articles avec les specimens dans les collections. Citer un specimen dans l'article pourrait permettre d'atteindre sa représentation physique dans les collections (figure 6, zoomer pour lire).

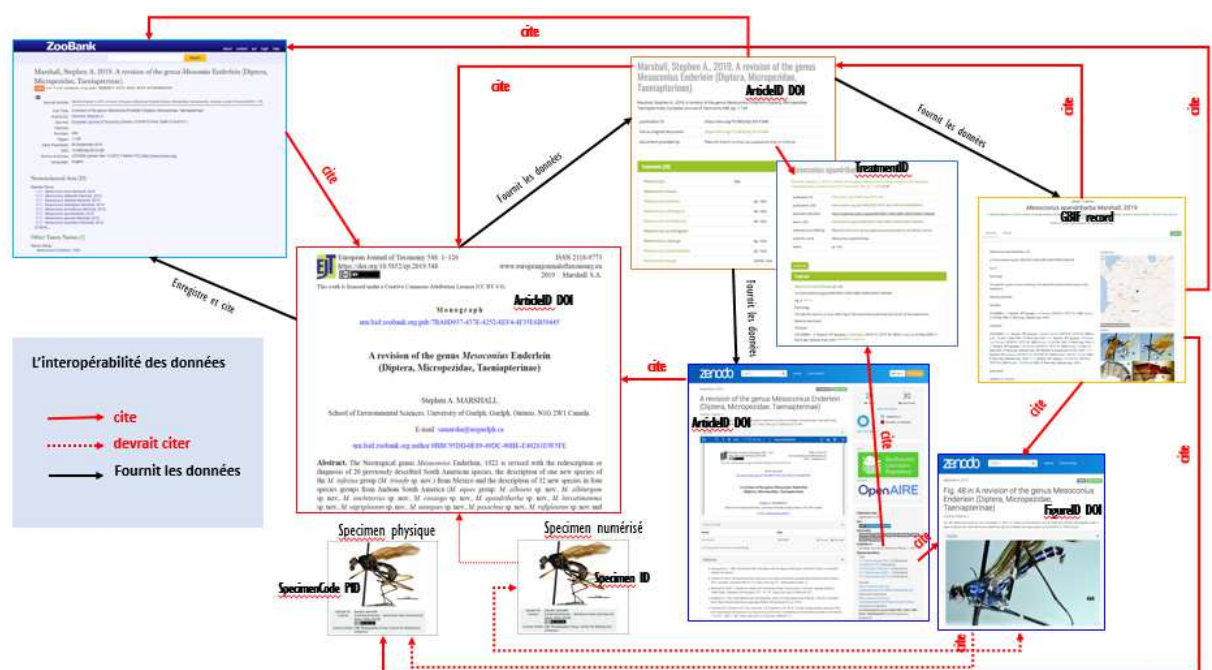


Fig. 6. Intéropérabilité des données depuis les publications © Laurence Bénichou

²⁴ Bibliothèque de données en Open Access

²⁵ DOI : digital object identifier ou identifiant numérique d'objet est un système d'identification de ressources, notamment d'articles scientifiques.

Tony Robillard.- Le Muséum dispose d'un service des publications scientifiques exemplaire en termes de techniques, d'Open Access. Quand on travaille sur l'évolution, on a envie de se dire : est-ce que je ne pourrais pas faire publier mes travaux au Muséum ou est-ce qu'on ne pourrait pas attirer des collègues pour publier dans nos journaux ? C'est souvent assez difficile car il n'y a pas de titres en fait qui parlent d'évolution. On fait très bien de la taxonomie, on traite très bien les questions de nomenclature, on fait des inventaires, des atlas, de très beaux travaux, mais il n'y a pas d'évolution dans tout ça. Je suis dans mon rôle de responsable scientifique en prenant ce recul-là. Pendant très longtemps la ligne éditoriale était de favoriser les publications liées aux collections du Muséum, mais pas question de publier les résultats liés aux thématiques portées par le Muséum. En 2017, on a élargi cette ligne éditoriale pour s'ouvrir à l'ensemble des activités scientifiques du Muséum, mais la question qui se pose vraiment est : est-ce qu'on ne pourrait pas faire quelque chose pour favoriser davantage la publication de résultats sur l'évolution au Muséum, par les agents et les étudiants qui font de très beaux travaux, et également par d'autres collègues d'autres communautés. C'est aussi notre rôle d'être visibles à l'international et dans la communauté française, d'afficher ces travaux sur l'évolution dans nos publications. C'est très important. C'est pour cela que je voulais vous parler, puisque nous sommes entre nous, de l'idée suivante : pourquoi ne pas créer un nouveau journal qui permettrait de publier des thématiques sur l'évolution en brassant très large, depuis la phylogénie jusque la microévolution, la modélisation, des thématiques qui ne sont pas publiables du tout dans nos journaux pour l'instant. Pour cela, il faudrait que l'on soit un petit nombre de gens motivés pour discuter, faire un projet et le proposer ensuite à l'établissement, au comité des éditions. On verra.

5. Voyage au coeur de l'Evolution: un programme de réalité virtuelle par Stéphanie Targui²⁶, Direction des Publics

« Voyage au cœur de l'évolution » est un programme en réalité virtuelle que nous avons conçu sous le commissariat scientifique de Guillaume Lecointre, entre 2016 et 2017 à l'occasion d'un mécénat de la Fondation Orange qui soutient le développement culturel via les outils numériques. Avant d'entrer dans le détail, voilà la bande annonce vidéo qui vous en dira un peu plus :

« Plongez au cœur de l'arbre du vivant. Voyagez dans le monde fascinant du vivant grâce à une expérience inédite et innovante en réalité virtuelle. »

²⁶ S. Targui est Cheffe du service des contenus numériques au Muséum.

Découvrez une classification qui donne à l'humain sa place parmi les espèces. Une place déterminée selon des critères scientifiques.

Remontez aux origines de la vie. Approchez LUCA, l'ancêtre commun de toutes les espèces vieux de 3,5 milliards d'années. A vous de jouer. Choisissez vos terrains d'exploration.

Explorez la biodiversité. A travers une sélection unique en son genre, rencontrez 460 espèces. Certaines que vous connaissez, et d'autres dont vous ne soupçonnez pas l'existence.

Devinez les relations entre les espèces. Les liens de parentés réservent parfois des surprises. Pensez-vous être plus proche d'un arbre ou d'un champignon ? Rencontrer des espèces impressionnantes. Découvrez des espèces en 3D comme vous ne les avez encore jamais vues. »

Comment on en est arrivés à faire ce projet ? Je travaille depuis longtemps au Muséum, au service de la diffusion des connaissances via des outils numériques. Je suis cheffe d'un service qui est composé aujourd'hui de huit personnes, deux chefs de projets numériques, trois chargés de contenus et un webmaster technique, développeur ainsi que son apprenti. Cette petite équipe est en réalité connectée à l'ensemble de la maison, les scientifiques, les médiateurs, les enseignants, la DIREF. Nous travaillons à l'année sur la production de contenus à la fois au service de la communication de l'établissement, de sa communication institutionnelle, de la communication de sa programmation, mais aussi de sa communication scientifique. Nous avons par ailleurs une mission de diffusion des connaissances en ligne vers le grand public. A ce titre et à l'année, nous produisons des contenus sur le web, mais aussi sur les réseaux sociaux. Il y a quelques années, nous avons lancé deux projets grâce au mécénat de la Fondation Orange. Le premier était une application mobile de visite de la galerie du musée de l'Homme pour les petits et le deuxième un MOOC (massive open online course) ouvert à tous les publics, sur les origines de l'Homme. Quand on fait un cours sur les origines de l'Homme au Musée de l'Homme, on est ravis d'accueillir quelques dizaines de personnes. Mais ce MOOC pendant six semaines nous avait permis d'atteindre 17 000 inscrits ! Cette expérience nous avait vraiment frappés, par la capacité des médias numériques de porter les messages de l'établissement, de transmettre au plus grand nombre, y compris à l'international, parce qu'on avait touché de nombreux pays étrangers francophones.



Fig. 6. Présentation par Stéphanie Targui du "Voyage au cœur de l'Évolution" en réalité virtuelle à la Grande Galerie de l'Évolution (cliché internet)

A l'occasion du bilan sur le MOOC avec la Fondation Orange, on a eu l'opportunité d'initier ce projet de voyage au cœur de l'Évolution en réalité virtuelle (figure 6). Avec, je l'ai dit, comme directeur scientifique Guillaume Lecointre, deux chefs de projets numériques qui nous ont accompagnés sur la durée, Jean Leborgne un assistant à la maîtrise d'ouvrage, en freelance, et Abila Benmiloud-Faucher une cheffe de projet chez Orange, et évidemment une équipe projet constituée d'un certain nombre d'acteurs de la maison. La réalisation a été faite par l'entreprise française Manzalab²⁷. C'est un outil avec des objectifs pédagogiques que nous nous étions fixés au départ : aider à comprendre l'unicité du vivant et sa diversité ; comprendre les liens de parenté entre les espèces ; découvrir, parce que c'est souvent le cas pour la plupart des gens qui suivent ce programme, l'histoire évolutive du vivant, sa classification, la place de l'Homme parmi les êtres vivants ; et aborder les grandes extinctions. C'est un programme tel que nous continuons à en développer, l'idée étant de produire des sites internet, des capsules de contenus sur les réseaux sociaux, mais aussi de miser sur ces nouveaux médias, qui sont diffusés où ? C'est la grande question. En réalité virtuelle, on a assez peu l'occasion d'en tester. Au départ, il a été conçu pour être diffusé online sur des plateformes. Donc ça implique d'avoir un casque (figure 7). Aujourd'hui, c'est très rare. Donc, assez rapidement, les échanges avec la direction des galeries, Cyril Roguier en l'occurrence, nous a permis d'envisager une installation du dispositif dans la Grande

²⁷ spécialiste des expériences immersives (AR/VR, Vidéo 360°), Paris

Galerie de l'Évolution, au départ sous la forme d'un seul casque installé sur le parcours du visiteur. Assez rapidement, le comité de pilotage que nous avons organisé s'est rendu compte qu'en termes de gestion de flux, ça serait compliqué à gérer : 14 minutes d'expérience individuelle dans un casque au milieu de la GGE. Cyril Roguet et le comité ont proposé au président Bruno David d'utiliser la salle au troisième étage où l'on présentait jusqu'alors l'histoire de la GGE depuis son ouverture. C'est à cette occasion que nous avons créé le cabinet de réalité virtuelle. Initialement ponctuel, le projet de voyage au cœur de l'Évolution en réalité virtuelle est devenu permanent.



Fig. 7. Utilisation du casque et des manettes dans le cabinet de réalité virtuelle à la GGE (cliché internet)

Avant de vous parler du dispositif de diffusion je voudrais vous dire que l'on avait été très vigilants, Bruno David nous l'avait demandé, Guillaume aussi, sur l'intérêt et la justification de l'usage de la réalité virtuelle. Au Muséum, on présente des spécimens, et nos visiteurs viennent pour les découvrir et les voir. A partir du moment où l'on a initié ce type de projet, on s'est engagés aussi à se dire que l'on produirait des contenus qui ne pourraient finalement pas présenter nos sujets autrement, ou du moins qui apporteraient une vraie valeur ajoutée dans la forme de présentation de ces sujets-là. Permettre à nos visiteurs de s'immerger dans l'arbre du vivant, d'approcher LUCA, que l'on parvenait plus difficilement à faire via un film, un livre. C'est d'ailleurs l'objet d'une recherche en cours en ce moment. On s'intéresse aux enjeux de la médiation grâce à différents types de formats. Je vous invite à venir découvrir et tester l'expérience. Vous verrez que le scénario est organisé en plusieurs parties. Dans la première, on est plutôt guidés à appréhender cette expérience immersive et à interagir avec le programme via les manettes (figure 7). On est aussi dans une séquence pédagogique.

Ensuite, on entre dans un mode libre, exploratoire où l'on va librement naviguer dans l'arbre. On peut aussi ouvrir d'autres modes plus ludiques, pour faire le jeu des parentés, comprendre qui est le proche de qui. On fait le pari que dans l'interaction et dans l'immersion, on arrivera à engager davantage nos publics dans la compréhension, parce que finalement, on le sait, le levier ludique peut être un bon vecteur pour appréhender certains messages qui sont un peu complexes à diffuser. C'est un programme de 14 minutes destiné aux plus de 12 ans. Il est en train d'être porté sur Oculus²⁸ qui a un autre type de casque afin d'ouvrir sa diffusion au plus grand nombre.

On ouvre le cabinet de réalité virtuelle les mercredi, samedi et dimanche, pour le moment, et tous jours des vacances scolaires, toutes zones. Nous avons atteint notre 10 000ème visiteur en juin 2019. C'est un pari gagné parce que nous sommes le premier muséum à le faire, en France, en Europe mais visiblement aussi dans le monde. Le premier à ouvrir une salle permanente de réalité virtuelle d'une part et à formaliser ainsi la théorie de l'évolution d'autre part. Nous sommes appelés par les autres muséums qui diffusent ce voyage au cœur de l'évolution. On a bien veillé à négocier les droits avec Orange afin de pouvoir déployer, diffuser ce contenu dans le monde entier. Typiquement, un des nos premiers partenariats de diffusion a été signé en mars avec le Chili. L'université de Santiago souhaite coproduire la version espagnole. L'idée est que chaque pays traduise le programme dans sa langue. S'ils ne le font pas, on leur donne quand même. Notre objectif est qu'il soit diffusé au maximum. S'ils le veulent bien, les muséums apportent l'expertise scientifique dans leur propre langue, pour traduire le programme qui bénéficie à toute la communauté des diffuseurs du programme. On va appliquer ce modèle de coproduction internationale et de codiffusion à d'autres programmes que l'on est déjà en train d'initier. C'est encore un peu tôt. J'espère vous donner l'année prochaine des nouvelles d'autres programmes de contenus en réalité virtuelle qu'on est en train de coproduire avec des partenaires internationaux.

²⁸ Société américaine, filiale de Facebook, qui a pour secteur d'activité la réalité virtuelle.

6. Débat : La place du Muséum dans l'enseignement et la diffusion de la théorie de l'évolution en France modération Guillaume Lecointre, Professeur, Conseiller scientifique du Président du Muséum

Guillaume Lecointre : *Le mot évolution a changé de sens au cours du temps. Au XVIIIème siècle, le mot évolution était réservé à ce qu'on appellerait aujourd'hui le développement embryonnaire. Lorsque le mot apparaît, c'est une métaphore utilisée par Spencer²⁹ pour parler du déploiement des êtres vivants au cours du temps, au sens du temps profond, alors que le mot était précédemment réservé à la trajectoire historique d'un organisme mais dans le temps de son existence. Avec Spencer, on dépassait le temps de l'existence de l'organisme pour se transférer dans le temps généalogique. Dans la première édition de L'origine des espèces de Darwin, le mot évolution n'est pas utilisé. Il parle de transmutation, et ce n'est que dans les éditions successives que le mot évolution finira par arriver. De quoi évolution est-il le mot aujourd'hui ? A partir de quelles propriétés parle-t-on d'évolution ? Je vais partir de cette question pour montrer à quel point au Muséum on a encore du travail en recherche et en diffusion pour être sur le front de l'évolution aujourd'hui.*

Il y a évolution à partir du moment où les entités varient. Entre nous, ce n'est pas un scoop. La variation est déjà comprise dans les propriétés physicochimiques de toute matière. La matière se définit précisément par le fait qu'elle change. Donc varier n'est pas franchement ce qui caractérise l'évolution. Pour qu'il y ait évolution, et ça c'est nodal, il faut que l'entité qui a varié transmette à un alter ego ce par quoi elle a varié. S'il n'y a pas transmission, il ne peut pas y avoir évolution. Les entités peuvent être les langues, les cultures, des protéines, des cellules, des organismes. On parle vraiment d'évolution « by large », comme on dit en anglais, s'il y a variation et transmission. La fréquence des variants dans la multitude va varier aléatoirement. Vous avez alors ce qu'on appelle un phénomène de dérive. Si dans ce système-là il y a des contraintes - il y en aura un jour ou l'autre parce que l'espace n'est jamais infini - alors seulement certains des variants vont avoir plus de succès que d'autres dans leur propre transmission et on aura un phénomène que l'on va qualifier de sélection naturelle. Pour qu'il y ait sélection naturelle, il faut qu'il y ait variation, transmission et contrainte. Voilà le tryptique qui fait qu'il peut y avoir évolution. Là où je vous invite à réfléchir largement, c'est qu'il y a beaucoup plus d'entités soumises à ce phénomène-là que nos propres disciplines sont prêtes à nous le laisser entendre. Lorsque l'on travaille en tant

²⁹ Herbert Spencer (1820 - 1903) était un philosophe et sociologue anglais.

que botanistes, entomologistes, primatologues, éthologistes, on voit l'évolution de sa fenêtre. Si parfois on ne la voit pas, c'est grâce à la fenêtre d'un autre qu'on s'aperçoit qu'elle y est, en fait. Par conséquent, l'évolution n'est pas servie par la fragmentation disciplinaire dont Damien parlait. Il faut attendre la fin du XXème siècle pour que la médecine devienne darwinienne, c'est-à-dire pour qu'elle incorpore des modèles variation-transmission-contrainte dans ses logiques de thérapeutique. Il faut attendre très tard pour que la psychologie incorpore dans ce cadre les motifs cognitifs qu'elle étudie pour en comprendre les origines.

Depuis 25 ans, beaucoup de choses ont bougé. Le module transmission a énormément changé. De sorte que notre galerie de l'évolution est obsolète, parce que le module transmission qui y est traité est uniquement régi par le segment génétique. La conception de cette galerie remonte à la période 1990-1994. C'est la fin d'une biologie très génocentrée. La triple hélice de Lewontin³⁰, c'est la fin des années 1990 déjà. L'émergence de l'épigénétique date de cette époque aussi. Ce module transmission change tellement qu'il y a eu un article dans *Nature* en octobre 2014 intitulé « Does evolutionary theory need a rethink ?³¹ », est-ce que la théorie évolutive a besoin d'être repensée ? Il y a une controverse dans cet article. Les uns disent, oui, il faut absolument refonder la théorie de l'évolution, les autres non, ce n'est pas vraiment le sujet. Je ne suis pas là pour trancher mais on voit bien dans cet article que c'est le module transmission qui a changé. On transmet beaucoup plus que des gènes aux générations suivantes. À tel point que Kevin Laland et ses collègues ont proposé « une synthèse évolutionnaire étendue »³¹. Quand je dis on, là encore, c'est très très large. On transmet évidemment des marques épigénétiques. On transmet aussi des cytoplasmes, des habitudes alimentaires, des cultures, et même des environnements avec la notion de construction de niche. Des motifs culturels et des environnements qui rétroselectionnent car ils jouent sur l'état du phénotype de la descendance. Par exemple, chez les humains, à l'échelle généalogique, les cultures, religions ou langues rétroselectionnent la structure génétique des populations, en vérité. Il y a des interactions entre les niveaux d'intégration. En outre, le

³⁰ Richard C. Lewontin (1929 -) est un biologiste, généticien et philosophe américain. Il a publié en 2003, *La triple hélice*, traduit par Nicolas Witkowski, éditions du Seuil, 160 pages.

³¹ L'article de Laland *et al* (2014), *Does evolutionary theory need a rethink ?*, *Nature*, 514: 162-164 est un débat entre deux points de vue. Kevin Laland, Tobias Uller, Marc Feldman, Kim Sterelny, Gerd B. Müller, Armin Moczek, Eva Jablonka et John Odling-Smee répondent « Yes, urgently ». Gregory A. Wray, Hopi E. Hoekstra, Douglas J. Futuyma, Richard E. Lenski, Trudy F. C. Mackay, Dolph Schluter et Joan E. Strassmann répondent, "No, all is well". Voir aussi l'exposé de la synthèse évolutionnaire étendue dans Laland, K.N. *et al*. 2015. The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions. *Proc. R. Soc. B* 282: 20151019. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1019>

développement embryonnaire est conçu aujourd'hui comme faisant partie du module de la transmission. Du fait même que le gène a changé de statut : le développement n'est plus le déploiement d'un programme contenu dans les gènes, mais une construction à plusieurs partenaires dans laquelle l'environnement intervient. On n'est pas obligés de comprendre le phénomène à l'échelle de l'impulsion génétique pour comprendre pourquoi ça se transmet. Le développement embryonnaire fait partie de la réalisation du phénotype à la génération suivante. C'est énorme. Enfin on atteint ce que l'évo-dévo³² avait voulu dans les années 1980, c'est-à-dire réconcilier la pensée du développement et la pensée phylogénéticienne ou évolutionniste. Ça y est, les objectifs de l'évo-dévo ont été atteints par des gens qui ne viennent pas de l'évo-dévo en réalité. L'évo-dévo se justifie dans la mesure où le développement embryonnaire fait partie de l'évolution. Cela implique que la catégorie platonicienne de l'individu a explosé, tout comme le programme génétique, et que le statut du gène a changé : nous ne sommes plus sur un gène régisseur ou notaire, mais sur un gène partenaire. On ne pense plus l'évolution comme on pensait il y a 25 ans. Ceci pour vous dire que notre galerie de l'évolution a besoin d'être rénovée. C'est un premier lancé de balle. Le deuxième que j'ai envie de vous donner, c'est d'ouvrir les disciplines à la pensée évolutionniste. Le journal « Pour la science » du mois dernier, de novembre, fait la Une sur la sélection naturelle au secours des thérapies contre le cancer. Ça veut dire que la sélection naturelle est rentrée dans le corps. Ce n'est pas ce qu'on a appris à l'école. Aujourd'hui, c'est trivial que de dire que vos cellules somatiques subissent des phénomènes de sélections à l'intérieur même de votre corps. Il n'y a plus une théorie générale du déploiement d'une lignée généalogique qui aurait besoin de la sélection naturelle d'un côté et de l'autre une théorie générale du déploiement de l'individu où il y aurait un programme génétique donneur d'ordres dont le rôle serait de régir la régularité de l'individu. C'est la sélection naturelle dans votre corps et l'intrication des pulsions génétiques qui font que votre individu est stable. Il n'y a pas besoin de programme en fait. Donc il n'y a plus de programme génétique non plus. C'est donc une invitation à penser l'évolution de manière large, ce qui nous fait nous rendre compte que nous-même au Muséum nous sommes encore insuffisants dans le suivi de cette révolution qui est en train de se faire. Ce que je viens de dire vaut pour nos galeries. Au niveau de la recherche, en revanche, il y a de l'interdisciplinarité bien sûr. Je pense à des programmes entre nos UMRs où la transmission verticale des langues, des musiques, et même des instruments de musique se pensent dans un cadre-généalogique.

³² L'évo-dévo est un champ disciplinaire de la biologie évolutive dont le but est d'étudier l'origine du phénotype à partir des gènes qui régulent son développement.

Pour terminer, je vais faire un retour en arrière puisque tu disais Laurent qu'on n'a pas eu d'introduction historique. Ce changement de forme de l'évolution aujourd'hui, ce n'est pas une révolution, c'est simplement une plus grande cohérence globale. Ce n'est pas un renversement. C'est une consolidation dont il s'agit. Je pense que ce serait faire honneur à la mémoire de Lamarck de ne pas lui attribuer la totalité de l'héritage transformiste, d'une part, et d'autre part de ne pas lui attribuer les mérites de l'épigénétique actuelle qui est, en réalité, darwinienne. J'entends par là que si l'on cherche des précurseurs transformistes en lisant Lamarck, on pourrait citer Cabanis³³ qui était un de ses contemporains et qui a aussi pensé à un mécanisme transformiste qui ressemblait fort à la sélection naturelle. Si vous remontez encore le temps, allez lire Maupertuis³⁴. C'est saisissant. Entre les lignes, c'est la fortuité, les combinaisons des organismes qui fait que seule une partie d'entre eux arrive à se reproduire. Et la régularité de l'organisme vient d'un cimetière invisible. Finalement, on a cette idée de la fortuité qui est à l'origine de la diversité de ce qui existe mais surtout les contraintes de l'environnement qui vont trier, filtrer une partie de cette diversité. Maupertuis concevait déjà cela : la variation est fortuite, les circonstances filtrent, et c'est ainsi que les espèces nous semblent régulières : ceux qui n'ont pas récupéré les combinaisons propices à la vie ont péri. L'ordre apparent provient d'un désordre initial. Ce qui est intéressant chez Lamarck c'est qu'il s'intéresse à l'origine de la variation. Il voit ça avec l'œil du physicien qui est en train de faire de la biologie puisque c'est lui qui invente le mot biologie. Il adopte une théorie instructiviste³⁵ de l'origine de la variation qui se produit précisément selon les besoins de celui qui la porte. L'ordre apparent provient de l'ordre initial des besoins individuels, et le milieu instruit ces besoins beaucoup plus qu'il ne filtre. On cite souvent l'hérédité des caractères acquis, bien sûr, mais personne ne sait à l'époque comment les caractères se transmettent et Darwin l'admet aussi. Ce n'est pas cela qui fait la différence entre les deux auteurs. Ce qui fait la différence, c'est que chez Lamarck la variation apparaît au besoin de son porteur alors que chez Darwin, la variation apparaît indépendamment de ces besoins (comme chez Maupertuis). Pour la simple raison que Darwin ne cherche pas à répondre nécessairement à la même question que celle de Lamarck. Lamarck cherche l'origine des innovations du lignage dans l'origine de la variation Darwin ne s'intéresse pas vraiment à l'origine de la variation. Il le dit : « nous pourrions nous y perdre s'il fallait qu'on documente

³³ Pierre Jean Georges Cabanis (1757 - 1808) était médecin, physiologiste, philosophe et député.

³⁴ Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698 – 1759) était mathématicien, physicien, astronome, philosophe et naturaliste

³⁵ Terme utilisé dans le domaine de l'éducation qui voit dans l'enseignant l'origine unique de la connaissance.

physiquement la survenue de chacune des variations ». Darwin s'intéresse plutôt à ce qui se passe pour le lignage des individus une fois la variation fortuite survenue.

*Je termine sur l'épigénétique puisque Laurent y a fait allusion. Les marques épigénétiques laissées par la génération précédente, qui régulent en quelque sorte les conditions d'expression des gènes dans la génération suivante, ces marques n'apparaissent pas nécessairement au besoin de leur porteur. Certaines marques épigénétiques, notamment celles induites par le stress, sont néfastes au phénotype de la génération suivante. Si vous réfléchissez un instant à ça, l'épigénétique moderne n'est pas lamarckienne, elle est darwinienne. Puisque pour Lamarck, la variation se produit selon les besoins du porteur, et pour Darwin, indépendamment des besoins du porteur. Et rappelez-vous, ce n'est pas l'hérédité des caractères acquis au cours de la vie individuelle qui distingue les deux auteurs. Faire de Lamarck le précurseur de l'épigénétique moderne, c'est mal comprendre ce qu'est l'épigénétique d'aujourd'hui. Au jeu des précurseurs, il est préférable d'honorer Lamarck pour ce qu'il a vraiment apporté : non pas l'épigénétique ou ce qui y ressemblerait, mais une vision matérialiste du vivant dans un siècle foncièrement finaliste. Tellement finaliste que Voltaire va s'en moquer dans *Candide*³⁶. Il y a un grand courage et une volonté théorique chez Lamarck mais le débat sur ce qu'il y aurait de lamarckien dans l'évolution d'aujourd'hui est un peu miné par les risques de l'anachronisme que l'on commet souvent lorsque l'on cherche absolument des précurseurs.*

On a une galerie de l'évolution à rénover, vous l'avez compris. Ce n'est pas parce qu'on caractérise le vivant qu'on fait de l'évolution. Bien des taxonomistes du XVIIIème et du XIXème siècles étaient fixistes. Régine a montré ce que les étudiants étaient amenés à faire sur la caractérisation des pièces dans la galerie. On a parlé aussi de clés de détermination. Tout ça peut se faire sans évolution. Que faut-il faire pour que nos chercheurs et nos étudiants modernisent l'enseignement et la diffusion de l'évolution ? Malheureusement, on n'a pas eu la possibilité de voir une intervention sur les modules doctoraux et peut-être que c'est le bon endroit pour fournir à des chercheurs de l'établissement et à tous ses étudiants les clés modernes de ce qu'est l'évolution aujourd'hui, beaucoup plus larges que ce qu'on a appris nous-même lorsque nous étions à l'école. Voilà pour le lancé de balle, si vous voulez prendre la parole.

³⁶ *Candide ou l'Optimisme* est un conte philosophique ironique publié par Voltaire en 1759 sous un pseudonyme.

Vincent Debat : *On a organisé depuis quelques années un GDR CNRS sur la plasticité phénotypique et la place de la plasticité dans la théorie évolutive, c'est-à-dire des effets environnementaux dans l'évolution. C'est un phénomène intéressant, mais on ne sait pas encore si la fixation génétique de caractères qui sont initialement induits par l'environnement, est vraiment important évolutivement. Ce n'est pas de l'hérédité de caractères acquis mais ça met en avant les interactions entre le génome et l'environnement. Ce qui est intéressant, c'est que ce phénomène relativise le réductionnisme génétique un peu forcené de la synthèse darwinienne. Il ne faut pas en faire trop non plus car c'est aussi tendre le bâton aux gens qui remettent en cause l'importance de la génétique ou de la sélection naturelle et de la vision un peu traditionnelle de l'évolution qui est toujours le paradigme central de la théorie évolutive actuelle. C'était un petit aparté.*

Sur la place de l'enseignement de l'évolution au Muséum, j'ai plusieurs remarques à faire. Je participe au module de tronc commun TC1B où les étudiants sont amenés à faire des projets sur un sujet un peu transversal. Je m'occupe d'un groupe qui a pour thématique la théorie de l'évolution. Il y a deux groupes qui se chargent de ça sur la trentaine. J'ai été complètement sidéré par le fait que ces deux groupes ont choisi la théorie de l'évolution par dépit. Tous les autres sujets avaient été pris. Je me demande dans quelle mesure c'est révélateur de l'importance que l'on accorde à l'enseignement de la théorie de l'évolution au Muséum. J'espère que ce n'est pas si révélateur que ça. Par ailleurs, je participe à l'encadrement des étudiants du master SEP en particulier pour leur stage de recherche dans notre équipe. Mon expérience ici est aussi relativement inquiétante dans le sens où les étudiants ont des lacunes énormes, principalement à l'échelle microévolutive. Je pense qu'il y a de quoi réfléchir sur l'organisation. Je ne sais pas si ça vient du tronc commun global du master où les étudiants ont des backgrounds très différents³⁷. Je ne sais pas s'il faut rajouter de la microévolution dans le tronc commun. Les étudiants qui sortent de SEP ne connaissent vraiment pas grand-chose à la microévolution, pas forcément dans le détail des aspects mathématiques de la génétique des populations, mais sur les concepts. Par exemple, comment on étudie la sélection naturelle. Ils n'en ont aucune idée, y compris à l'échelle macroévolutive. J'ignore si la méthode comparative phylogénétique est enseignée dans le master SEP. Estimer le signal phylogénétique, tester des hypothèses adaptatives à l'échelle macroévolutive, en contrastant les patrons de divergence par rapport à des modèles neutres. J'étais sidéré de voir que les étudiants n'y connaissaient rien, n'y comprenaient rien. Du coup, on est un peu hésitants à

³⁷ Voir la fin de la présentation de R. Vignes-Lebbe page 11.

prendre en stage de M2 des étudiants issus de SEP dans notre équipe où l'on fait pas mal de microévolution. Je pense qu'il y a une réflexion à avoir pour combler cette lacune.

Guillaume Lecointre : *Je suis entièrement d'accord. On a des lacunes dans nos enseignements. Je voulais apporter un complément. Il y aurait même besoin, soit au niveau doctoral soit au niveau master, de reprendre les fondamentaux. Ce n'est pas parce que les fondamentaux sont fondamentaux qu'on peut se permettre de ne plus jamais y revenir après les avoir appris au plus jeune âge. Les fondamentaux se retravaillent. L'épistémologie de nos propres disciplines continuent à avancer. Même les fondamentaux se refondent sur eux-mêmes. Le statut du module transmission, par exemple, fait partie des fondamentaux qui ont été beaucoup bousculés ces 25 dernières années. Ce qu'ont reçu nos étudiants dans leurs cours des premières années universitaires par inertie du système, ça reste en arrière de ce qu'il se passe aujourd'hui dans les Reviews des grands journaux. Il y aurait besoin de réviser les fondamentaux même à un niveau master ou à un niveau doctoral. Régine, je te laisse en parler mais je crois qu'on nous a déjà signalé qu'il y avait des lacunes.*

Régine Vignes-Lebbe : *Oui, je suis tout à fait d'accord. D'ailleurs j'ai mis dans ma présentation une diapositive où je faisais apparaître un certain nombre de lacunes, dont certaines concernant des aspects de connaissances en génétique, des processus évolutifs. Il faudrait créer un groupe qui mènerait une réflexion et ferait une proposition pour faire avancer l'enseignement. Ce serait vraiment important. C'est quelque chose qui se dit déjà depuis des années mais qui n'a pas forcément évolué. C'est très important d'avoir le retour de ceux qui encadrent nos étudiants. J'avais encadré un stage de master 1 où j'avais voulu qu'une étudiante regarde ce qui avait été appliqué comme méthodes dans les stages de M2 pour voir l'évolution des méthodes mais aussi les lacunes qu'il y avait entre ce dont les étudiants avaient besoin pendant leur stage et ce qui était enseigné. Je pense qu'il y a là une source qui peut alimenter la réflexion et argumenter les manques dont du parles. Si vous le ressentez, c'est qu'il faut faire quelque chose.*

Guillaume Lecointre : *Vincent, est-ce que cette lacune est rattrapée au niveau doctoral ?*

Vincent Debat : *Il y a un module d'école doctorale d'Eric Guilbert qui traite de l'évolution à l'échelle macroévolutive selon la méthode comparative phylogénétique. Je sais que c'est au moins en partie comblé. Je pense qu'il y a la place pour développer des choses sur les aspects microévolutifs.*

Véronique Barriel : *Je voudrais rebondir sur cette remarque. C'est un constat que l'on a fait au sein du master. Beaucoup de gens nous ont signalé des manques à différents niveaux et pas uniquement celui-ci. Je me souviens d'une réunion dans le bureau de Régine, où tu étais présent Guillaume. Nous avons listé toutes les UE qui potentiellement trouveraient leur place. Avec Régine, ça fait très longtemps que l'on a remarqué que l'UE de génétique des populations qui est proposée en M1 par Eric Bonnivard³⁸ dans le parcours SEP, UE qui était initiée au départ pour le master BEE, n'est pas tout à fait adaptée à SEP. Nous avons toujours été favorables à avoir par exemple une UE de génétique des populations en SEP, mais une UE c'est une semaine d'enseignements, 3 ECTS, et on n'a jamais trouvé d'enseignants qui acceptaient de faire une UE dans SEP. Ok Vincent pour te charger d'organiser cette UE, avec des intervenants que tu penses compétents. On a fait ce constat depuis de très nombreuses années.*

Amélie Vialet : *Juste pour sortir du cadre strict de l'enseignement et de ce master, je trouve que c'est une question qui se pose dans toutes nos missions. Je ne sais pas si dans les formations que vous proposez aux enseignants vous allez jusqu'à l'explication des mécanismes de l'évolution, comment on les met en évidence. Je ne sais pas si dans la visite virtuelle³⁹ que vous proposez vous parlez de ces mécanismes ou si on reste toujours sur la diversité du vivant.*

Guillaume Lecointre : *C'est uniquement l'exploration de l'arbre du vivant et encore à mes yeux on ne va pas jusqu'au bout de ce que l'on aurait pu faire.*

Amélie Vialet : *Donc le constat, c'est que cette lacune est absolument partout et si quelqu'un commence à construire quelque chose, il faudrait penser à ce que ça irrigue jusqu'au bout, jusqu'à la diffusion, jusqu'au cours en ligne, aux formations des enseignants. Je pense que si on met le point là-dessus, il faut s'organiser pour que ce soit constructif à tous les niveaux.*

Véronique Barriel : *Suite à l'ensemble des interventions qu'on a eues ce matin - je vous félicite, j'ai trouvé ça passionnant - je me demande, aussi bien dans la formation vis-à-vis des enseignants du secondaire, dans les moocs, etc., quels moyens on aurait de combiner tout ça ? Je pense, comme Amélie le disait, qu'il y a des éléments déjà disponibles. Je ne suis pas*

³⁸ E. Bonnivard est Maître de conférences à la station marine de Roscoff (SU).

³⁹ Visite virtuelle de l'arbre du vivant dans le cabinet de réalité virtuelle de la grande galerie de l'évolution

allée voir dans les formations ou autres ce qu'il se passe sur la microévolution, dont tu parlais Vincent. S'il y a déjà un travail conséquent qui a été mené par certaines directions, structures, quels seraient alors les moyens pour - je vais utiliser un terme que je n'aime pas trop - mutualiser, mettre à profit tout ce que l'on a vu là pour qu'on puisse l'intégrer. Je ne vais pas envoyer tous les masters, mais pourquoi pas d'ailleurs, faire 15 minutes d'exploration virtuelle, moi-même je ne l'ai pas encore fait parce que je n'ai pas trouvé le temps de m'y inscrire, mais je veux y aller. Est-ce que potentiellement on peut envoyer nos 40 étudiants de M1 ? C'est une question que je pose. Si c'était possible, il faudrait trouver des créneaux ce qui n'est pas simple non plus dans les plannings, mais pourquoi pas. Je pense qu'il y a des tas de choses qui sont déjà là pour répondre à des manques, des demandes, etc.

Stéphanie Targui : *Je me fais la même remarque. On travaille pour des missions, dans des services et des départements de manière un peu décorrélée et il est vrai qu'en termes de méthodologie et d'organisation, il y a peut-être quelque chose de nouveau à imaginer sur des thèmes transversaux au Muséum, autour desquels les services de l'établissement s'accorderaient. Peut-être un thème par an mais là c'est vraiment du brainstorm. Moi aussi je lance une balle. Ça existe aujourd'hui. Cela a été mis en place lors de la programmation, je le sais, avec la nouvelle organisation voulue par Bruno David. Sa mise en place a fait qu'on a pu parvenir à s'accorder, à travailler ensemble en multisites avec l'ensemble des MJZ sur la coordination de nos actions de programmation pour accueillir le public. En tout cas, on a réussi à le faire de manière transversale sur cet axe-là. Je trouve que ce serait intéressant de le faire aussi sur des grands sujets qui traversent le Muséum. Je suis complètement d'accord et on s'est souvent dit avec la direction de l'enseignement que vos initiatives pourraient bénéficier à nos publics, au grand public, et que nos initiatives pourraient profiter aux vôtres, enseignants et élèves. Et pour répondre à la question de recevoir les étudiants, avec grand plaisir parce que l'on constate que l'on communique vers l'extérieur, c'est-à-dire vers les visiteurs, mais pas vers les publics internes, les chercheurs, les gens de la maison. Ça serait fabuleux de pouvoir les accueillir. C'est possible techniquement. Je le sais car le cabinet de réalité virtuelle n'est ouvert au public, comme je l'ai dit dans ma présentation, que le mercredi, le samedi et le dimanche. Ça nous laisse quelques jours en semaine. Sous réserve de la disponibilité des gens sur place mais ça s'organise. Ça me semble être une très bonne idée.*

Régine Vignes-Lebbe : *Sur la visite, je trouve ça vraiment super et sur toutes les ressources dont a parlé Emilie Detouillon, je pense qu'il y a des choses très intéressantes. A voir comment en profiter. Par contre, j'ai une toute petite remarque. C'est vrai qu'il faut faire évoluer les contenus, je suis tout à fait d'accord sur la critique, mais il faut aussi bien comprendre que les stages font partie de la formation. C'est de la formation par la recherche. Les stages font partie intégrante de la formation des étudiants. C'est peut-être quelque chose qui faut redire et mettre en avant aussi.*

Laurent Palka : *Je voudrais faire deux remarques. La première concerne ce que Tony Robillard a dit. Est-ce qu'il est possible ou utile de créer un nouveau journal au Muséum sur l'évolution ? La deuxième, pour revenir sur la question du débat. On a parlé de lacunes au Muséum. Est-ce que l'on sait s'il y a des lacunes ailleurs qu'au Muséum et quelle est la place du Muséum dans toutes ces lacunes et sa place dans l'enseignement et la diffusion en France. Par exemple, ici on a une étudiante de M1 qui vient de Brest, donc on peut dire en tout cas que la journée scientifique de la SECM irradie largement en France.*

Guillaume Lecointre : *Sur la première question, je commencerais par faire un tour international des revues d'évolution et de regarder ce qu'elles publient. On peut faire en effet un journal sur l'évolution au Muséum pour compléter notre panel de thématiques. Faut-il encore que la communauté professionnelle et internationale puisse se reconnaître dans ce journal, sans faire de duplicat avec d'autres revues. Il faut l'analyser. Je n'ai pas de réponse mais Laurence a levé la main et elle en a sûrement une. Concernant la deuxième question, on fait partie d'un réseau de sept musées européens qui ont beaucoup moins de chercheurs que nous et si vous comparez musée à musée, il y a beaucoup plus de lacunes ailleurs que chez nous. Mais des lacunes chez nous, il y en a toujours eu. Entre 1793 et 1830, on était le phare mondial de l'histoire naturelle avec Geoffroy Saint-Hilaire et Lamarck bien sûr, Cuvier aussi pour des raisons théoriques différentes. Dans les années 1830 à 1880, pendant 50 ans, le Muséum a été un milieu de conservatismes. Je vous renvoie au dernier livre de Pascal Tassy⁴⁰ au sujet de Gaudry. Gaudry est celui qui, au milieu d'une assemblée de professeurs fixistes et très conservateurs, va pousser et réussir à convaincre de faire une galerie de paléontologie dans laquelle la scénographie va mettre le résultat de l'évolution en scène. Le geste de Gaudry est de convaincre le public, avec des pièces fossiles, qu'il y a eu une évolution de la vie. Il l'a fait dans un contexte hostile. Donc des lacunes dans l'établissement, si on jette un*

⁴⁰ Voir préambule

regard rétrospectif, et un petit peu anachronique aussi, on voit que l'on en a eues bien sûr. C'est normal. Par contre, compte tenu de l'extension du concept d'évolution dans tous les secteurs, c'est dans la formation que la question doit être posée. En matière de recherche, il n'y a pas d'établissement qui fasse tout. Je sais qu'à l'ISEM (Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier), ils ont une belle palette de ce qui se fait en évolution. Ils sont vraiment très complets là-dessus. Nous, on l'est peut-être un peu moins, mais on fait plus de caractérisation de la biodiversité qu'ils ne le font. Les lacunes, il y en a ailleurs mais la question est vraiment celle de l'enseignement.

Laurence Bénichou : *Je voudrais préciser une chose pour éviter les malentendus. Peut-être que la présentation sur les publications scientifiques n'était pas bien orientée. Je m'explique. On parle de diffusion des connaissances et de créer un nouveau journal sur l'évolution, pourquoi pas. Encore une fois, si c'est un journal des publications scientifiques, ce n'est pas forcément la cible que vous voulez atteindre lorsque vous parlez de diffusion des connaissances. Les publications scientifiques, je vous le rappelle, ce sont des chercheurs pour les chercheurs. Ce sont des résultats originaux de recherche. On ne vise pas du tout le public dont on est en train de parler là. Si on cherche à viser un public qui est externe à l'établissement, côté grand public, pour une diffusion plus large, ça peut être une excellente idée et avoir un sens. Mais encore une fois, pour les publications scientifiques, je rejoindrais Guillaume, il faut déjà regarder le panel des revues existantes. Peut-être qu'il y a une niche, mais on n'a pas fait ce travail-là. C'est une balle que Tony avait envie de lancer et c'était l'occasion. Peut-être que c'est une balle à rebonds et qu'il faudrait la lancer côté grand public et des éditions vers le grand public, ou un public plus averti, pour atteindre davantage notre cible.*

Guillaume Lecointre : *Je précise que les éditions grand public du Muséum ont déjà fait ponctuellement des livres qui traitent explicitement de la question de l'évolution. C'est déjà fait mais ce n'est pas si fréquent.*

Stéphanie Targui : *Je rebondis et je me dis qu'il y a un média bien pratique parce qu'il est permanent, il est accessible à tous depuis son smartphone, c'est le web du Muséum, le site internet. On s'engage dans sa refonte actuellement. La nouvelle version va sortir à l'automne*

2020. Nous pensons que l'on pourrait utiliser, un peu comme la Smithsonian⁴¹ le fait d'ailleurs, le web pour faire un magazine en ligne, mais grand public, avec des rubriques qui pourraient être justement ces grands sujets. Je trouve que commencer par l'évolution serait plutôt une bonne chose, dans la mesure où comme on le sait, il existe beaucoup de ressources évidemment dans la maison. Ca nous permettrait de décliner l'arbre du vivant en version web, ce que l'on veut faire depuis longtemps. On est sur 1,6 million de visiteurs distincts par an, uniquement sur mnhn.fr, je ne parle pas des 85 sites internet autour. On est à six millions de visiteurs par an on-line aujourd'hui sur l'ensemble de nos sites internet. C'est du contenu accessible en permanence. On n'est pas dans la même démarche que l'achat d'un livre, qui nécessite quand même d'aller dans une librairie, d'avoir un objectif bien en tête, de se déplacer, d'aller l'acquérir. Bien sûr on peut l'acheter en ligne. Je veux dire que, comme vous l'avez relevé dans le projet scientifique et culturel (PSC) en train d'être écrit aujourd'hui, un enjeu est le numérique et la manière dont l'information est diffusée sur le web. Le Muséum pourrait essayer de réunir un collectif d'écriture pour s'emparer de ce média-là. Mon équipe, vu que l'on est aussi l'équipe de communication numérique, est toujours en première ligne pour faire la promotion des expositions, de nombreuses choses. A nous seuls, nous ne sommes pas suffisants. Mais si on décidait d'engager une action qui consisterait à monter un collectif de nouvelles écritures comme on dit, autour de ces questions-là, ça me semble tout à fait envisageable, notamment dans le cadre de la refonte du site mnhn, puisqu'on est en train de concevoir les nouveaux gabarits de pages, et qu'on envisage justement des sortes de homepages thématiques qui pourraient faire remonter des articles, des dossiers, des contenus, des moocs, des cours, tout ce qu'on veut en fait.

Vincent Debat : J'ai plusieurs remarques. Une sur la question des lacunes car c'est une discussion qui, en fait, a été menée au cours des journées sur l'évolution à Paris organisée le mois dernier par Guillaume Achaz⁴². Il y a eu une réunion avec ceux impliqués dans des enseignements sur l'évolution dans la région parisienne, sur l'identification des lacunes et si on pouvait élaborer une réponse. Ça n'a pas abouti pour l'instant. Il n'y a pas eu de propositions vraiment concrètes. Il y a eu un tour d'horizon, dans les différentes facs, aux différents niveaux de cursus. Je ne parle que de l'enseignement. Par rapport à la question, qu'est-ce que l'on fait concrètement, je suis très motivé pour essayer de lancer quelque chose.

⁴¹ La Smithsonian Institution est un établissement scientifique américain fondé en 1846 à Washington, de la volonté du scientifique britannique James Smithson, pour l'accroissement et la diffusion du savoir pour tous les hommes.

⁴² G. Achaz est membre de l'UMR 7206 - Anthropologie Génétique (AGène)

Il faut que je vois avec G. Achaz où ils en sont, quelles initiatives ont été prises. Je ne sais pas si au Muséum on se lance pour proposer un nouveau module, à quel niveau, celui du master ? C'est vrai qu'il y a déjà des choses faites à l'école doctorale. Il y a un module de Sarah Samadi qui est pas mal, mais ça arrive trop tard. Il faut qu'on fasse quelque chose avant. Je veux essayer déjà de faire un tour d'horizon de différents modules du master dans lesquels il y a des choses qui se font dans ces questions de microévolution, d'adaptation, de sélection naturelle pour voir qui solliciter, et utiliser ce qu'on a déjà. Solliciter des intervenants. Ça m'intéresse de faire ça. Il faut que je voie avec la direction de l'enseignement. Sur la question du journal, je trouve que c'est une idée hyper intéressante parce qu'il y a quand même une espèce de fronde, le terme est un peu fort, mais une révolte sur le monde de l'édition scientifique. On en a ras le bol de payer des sommes faramineuses, de travailler gratuitement pour l'édition. Un certain nombre d'initiatives ont été prises. Un Peer Community In a été amorcé à Montpellier. Il y a justement un journal Peer Review in Evolution. Je ne sais pas comment ça pourrait s'articuler. S'appuyer sur des maisons comme le Muséum qui peuvent permettre de faire de l'Open Access diamant⁴³, ça serait super.

Laurence Bénichou: *Je vais commencer puis je donnerai la parole à Tony parce que l'on n'est pas d'accord. C'est bien, comme ça il y aura les deux versions. PCI ou Peer Community In est une initiative qui a été lancée par des chercheurs. La première était d'éviter la difficulté de trouver des referees dans l'évaluation par les pairs. C'était le premier critère qui avait été mis en avant pour essayer de squeezer la lenteur des publications et le fait qu'entre la soumission et la publication il peut y avoir énormément de temps parce qu'il y a des allées et venues avec les referees et que les rédactions prennent du temps. L'idée est bonne en soi sauf que ça brouille les pistes. D'un point de vue technique, je trouve que c'est une super mauvaise idée parce que le processus de PCI est la transparence. Toutes les versions de l'article sont disponibles sur le site et pourvues d'un DOI. Ce qui fait qu'il y a n versions d'un même article. On ne sait plus quelle est la version finale. Pour moi, ça squeeze l'essence-même de l'évaluation par les pairs qui est un aller-retour, une argumentation entre l'auteur-chercheur et le referee-chercheur qui vont argumenter pour arriver à une version finale. On enlève ça et on se retrouve avec n versions. Tout est disponible mais on ne sait plus laquelle est la bonne et en termes de référencement, on ne sait pas laquelle va être citée, qui va citer quoi. Avec un DOI sur chaque version, à terme, on se retrouve avec des citations d'une version 1 qui n'a pas été référée ou d'une version 12 ou d'une version minimale. On a*

⁴³ Voir la présentation de Gildas Illien et Michel Guiraud page 67.

décidé au Muséum - je sais Tony n'est pas d'accord, il lève la main, il s'énerve mais je vais lui laisser la parole après - pour l'instant de refuser les articles qui étaient soumis sur PCI pour cette raison. En taxonomie, c'est hyper dangereux, on est d'accord, mais y compris pour les autres disciplines. On trouve que ça rend confus le message qui est envoyé.

Tony Robillard : Je vais me faire le défenseur de la PCI. En fait, il y a une incompréhension du système PCI dû à un mélange entre la PCI et les BioRxiv⁴⁴ qui sont non reviewées, de sorte qu'il peut y avoir de nombreuses versions. Le système PCI va servir à recommander une de ces versions qui va être définitive. On peut soumettre ses manuscrits à BioRxiv et ensuite être publié dans des journaux comme *Evolution*, *American Naturalist*, etc. Une version des BioRxiv va être validée par le journal et être publiée. Il n'empêche que les versions non publiées vont rester accessibles de la même manière. Il n'y a pas beaucoup de différences entre la PCI et un journal traditionnel. La seule différence, c'est que la PCI se substitue en partie au journal en recommandant certains articles. C'est une sorte de validation. Une autre différence est que le travail des referees est visible, notamment leurs échanges entre le ou les auteurs. L'honnêteté est complète ou la transparence est assez exemplaire. Un journal comme *PeerJ*⁴⁵ est en train de faire la même chose, ou *PLOS One*⁴⁶ qui veut rendre visible tout le processus de referee sur la base d'un volontariat. C'est quelque chose qui est en train de se mettre en place de toute façon. On peut aimer ou pas aimer. Les recommandeurs de la PCI sont les éditeurs en fait. Ils ont inventé des noms qui viennent brouiller les pistes, je suis d'accord. C'est un système de journal électronique. Par contre, il n'y a pas de capture. Un article qui est recommandé par la PCI reste disponible pour la publication.

Laurence Bénichou : J'ai la même critique vis-à-vis de la PCI que vis-à-vis des archives ouvertes et de l'Open Access vert⁴⁷. Encore une fois, ce qui gêne, c'est la confusion que ça apporte. On mélange ce qu'on appelle la littérature grise et la littérature certifiée, publiée. Tant que cette espèce de brouillard n'est pas levé, je trouve que ça fait du bruit documentaire.

Tony Robillard : Cette discussion par rapport à un nouveau journal est née des réflexions sur la question suivante que nous avons aux Publications scientifiques : que doit-on faire des articles qui nous arrivent et qui nous sont recommandés par la PCI. Ce sont des articles

⁴⁴ BioRxiv se prononce bio-archive. C'est une archive de dépôt de préprints qui sont les versions d'articles scientifiques pas encore acceptées par les referees.

⁴⁵ *PeerJ* est une revue de biologie et de médecine, à comité de lecture et libre d'accès.

⁴⁶ *PLOS One* est une mégarevue diffusée exclusivement en ligne.

⁴⁷ Voir page 20.

souvent de très bonne qualité, qui vont pouvoir aller dans de très bons journaux. L'idée c'est de passer à côté du système des grands journaux élitistes où il faut tout payer et en plus où il y a une limite de places. On peut s'en soustraire dans les journaux du Muséum parce qu'on a tous les avantages que présente la PCI. On évite le fait de payer dans tous les sens, d'avoir une limitation de places parce qu'un journal, c'est tant de pages, et on ne peut pas publier plus parce que « désolé, c'est super intéressant ce que vous faites, nos referees sont d'accord pour dire que c'est exceptionnel mais on est limités et on ne va publier votre article ». Les critères utilisés pour refuser ne sont pas scientifiques. En ayant un journal comme on fait ici, on peut éviter tout ça. Avec des articles déjà recommandés, de très bonne qualité comme ceux qui attendent d'être publiés éventuellement par la PCI. Il y a déjà du contenu disponible et une vraie place, une niche à prendre puisque pour le moment, il n'y a pas de journal sur l'évolution qui soit gratuit de cette manière-là et de qualité.

Guillaume Lecoindre : Tony a apporté la réponse à la question qu'on se posait tout à l'heure.

Laurent Palka : Je vais changer un peu de sujet. Je veux faire deux remarques. Tout à l'heure tu as dit Guillaume qu'il doit y avoir un dialogue entre les disciplines. On peut imaginer aussi un dialogue avec les expositions. On peut très bien avoir dans les expositions au Muséum des contenus qui donnent et diffusent une explication sur l'évolution. Il y a pas mal d'expositions où l'évolution pourrait être présente. Ma deuxième remarque, concerne non seulement l'enseignement mais l'éducation. Quand Vincent dit que les masters ont des lacunes, moi j'y vois un manque d'éducation à l'évolution et le Muséum a un rôle à jouer. Cette éducation va loin. Par exemple j'ai eu à faire récemment à des jeunes, qui n'étaient pas des créationnistes, mais qui refusaient quoi que ce soit sur l'évolution, parce qu'ils ne connaissaient absolument rien, avec des lacunes insondables. Et bien moi en face, j'étais totalement démuni. Je suis capable de parler d'évolution avec des gens qui savent de quoi on parle, autrement c'est un dialogue de sourds. Pour lutter contre les créationnistes, l'intelligent design, etc., on a besoin d'éducation à l'évolution.

Guillaume Lecoindre : On le fait en aidant les enseignants mais il y a un public que l'on ne touche pas. Ce sont les premières années après l'université. C'est un public fragile. S'il fallait qu'il y ait une cible, ça serait celle-là. On sait que les étudiants sortent de terminale en

ayant bien sûr entendu parler d'évolution parce qu'au lycée on en parle quand même⁴⁸, mais pas suffisamment peut-être pour pouvoir s'en emparer eux-mêmes. Ça dépend des situations. Les premières années universitaires sont des années à investir d'autant plus qu'apparemment, vous me corrigerez Régine et Véronique, mais je crois que les cours sur l'évolution pour les licences se sont érodés ces dix dernières années, de l'autre côté de la rue Cuvier. Ce qui amplifie le côté lacunes dont parle Laurent, c'est que, sagissant de la biologie, les cours intégratifs, qui prennent l'évolution en compte, ont diminué au profit, d'après ce que j'ai compris, des sciences biomédicales, des neurosciences et de la biochimie. Ainsi, les étudiants venant de SU sont moins formés à l'évolution qu'ils l'ont été à une époque. Ça peut poser problème en effet. Ce que tu dis va dans le sens de ce que je disais tout à l'heure, à savoir : même s'ils arrivent en M1 ou en M2, il faut remobiliser les fondamentaux dont on a besoin au Muséum. Des fondamentaux qui ont pu être un moment enseignés il y a très longtemps, que les étudiants ont eu le temps d'oublier peut-être. Quand on me demande de parler d'évolution depuis la base, je le dis sans ambage, j'appelle un chat un chat, je commence par descendre Platon. Il n'y a que ça à faire parce qu'une bonne part des obstacles à la compréhension de l'évolution viennent du fait que les héritages monothéistes ont légué dans la tête des gens cette notion tacite que l'Idée préside, transcende les entités matérielles qu'on est censées étudier. La fixité de la boîte l'emporte sur le changement incessant de son contenu matériel, si tu préfères. Il faut passer son temps à raconter que c'est nous qui faisons les boîtes et que les contenus changent. On arrête de dire que les groupes « descendent les uns des autres » parce que les groupes c'est nous qui les faisons. Les groupes s'emboîtent les uns dans les autres, c'est autre chose. C'est alors que tout le vocabulaire fondamental est à réviser. Tu as raison, si le vocabulaire fondamental n'est pas révisé avant de mettre un pied en science, nos étudiants peuvent avoir des blocages de compréhension sans comprendre d'où ils viennent.. Ils ne sont pas spécialement malintentionnés ou en posture de refus. Ils sont en posture de blocage potentiel. Il y a des difficultés à comprendre parce que les principaux verrous n'ont pas été traités. Je pense que le tronc commun du master essaie de faire ça quand même, il me semble. Comme les étudiants viennent d'horizons très différents, il y a des fondamentaux qui sont donnés dans différentes matières. Il faudrait peut-être que l'on renforce l'évolution dans le tronc commun du master. Ce sont des idées que l'on brasse.

⁴⁸ Voir la présentation d'E. Detouillon page 11.

Nicolas Gentis : *Je voulais revenir sur le fait que certains étudiants prennent l'évolution par dépit en dernier. En fait, on entend toujours la même chose. On va revenir à l'histoire des sciences, Darwin et puis ça s'arrête. Le sentiment que l'on a un peu tous, c'est que arrivés en master, on a envie d'aller plus loin dans les choses, on cherche cette spécialisation, qu'on ne trouve pas toujours forcément. C'est éternellement, revenir au début. Certains étaient géologues et n'ont peut-être pas entendu parler de ça. D'autres en avaient entendu parler. Nécessairement, il faut y revenir aussi. Mais on voudrait entendre quelque chose de nouveau. Toujours parler de Darwin, Darwin, Darwin, ça peut plaire à certains, ok, mais concrètement, qu'est-ce qu'il se passe, qu'est-ce qu'il y a ?*

Guillaume Lecointre : *Si vous avez bien écouté ce que j'ai dit tout à l'heure, c'est exactement ce dont il s'agit. Le paysage de l'évolution aujourd'hui n'est plus celui d'il y a 25 ans. A fortiori, il n'est plus celui de Darwin en son époque bien sûr. Même si paradoxalement, le paysage d'aujourd'hui est plus darwinien que le paysage à la Ernst Mayr⁴⁹ qu'on a reçu nous quand on était à la fac. On revient à Darwin, je suis désolé : la synthèse évolutionnaire étendue, en faisant sortir la biologie de son génocentrisme, permet de comprendre l'évolution de manière moins réductionniste, comme le faisait Darwin. S'agissant d'histoire des sciences, il y a tout intérêt à revenir à Maupertuis ou à Lamarck aussi bien sûr. Pour ceux qui sont postérieurs, on peut travailler avec Simpson⁵⁰, Hennig⁵¹, Haeckel⁵². Mais que je me fasse bien comprendre, il ne s'agit pas de ressasser les mêmes fondamentaux, mais d'aller plus loin dans la façon dont on les envisage. On peut difficilement faire de l'évolution en ayant gardé le bagage intellectuel de Linné ou de Platon. Je cite des auteurs trop anciens, bien sûr, mais ils ont été fondateurs et on sait que ce sont leurs héritages qui restent dans les têtes aujourd'hui. Donc, ce n'est pas de notre faute s'il faut aller plus profondément sur la façon dont Ernst Mayr a trahi Darwin au XXème siècle. Ça impacte beaucoup l'enseignement de l'évolution jusqu'aux générations récentes. Seulement pour traiter cette question, il faut aller plus en profondeur que ce qu'on a fait en terminale ou en M1, en retournant aux fondamentaux.*

⁴⁹ Zoologiste (1904-2005), E. Mayr fut l'un des concepteurs de la théorie synthétique de l'évolution ou néodarwinisme.

⁵⁰ Paléontologue américain, George Gaylord Simpson (1902-1984) a été l'un des trois contributeurs majeurs, avec Theodosius Dobzhansky et Ernst Mayr, de l'élaboration de la théorie synthétique de l'évolution.

⁵¹ Emil Hans Willi Hennig (1913 - 1976) était un biologiste allemand qui est considéré comme le fondateur de la systématique phylogénétique ou cladistique.

⁵² Ernst Haeckel (1834-1919), médecin allemand puis professeur d'anatomie comparée fut à l'origine des notions d'embranchements, d'écologie, de protistes et proposa un arbre du vivant qui fit longtemps autorité et popularisa la théorie de l'évolution.

Vincent Debat : *J'entends bien ce que dit Nicolas. C'est un retour que j'ai eu aussi par d'autres étudiants qui disaient que d'une certaine façon, ils en avaient marre qu'on leur répète un peu les mêmes choses, en long, en large et en travers. Je pense que la partie histoire des sciences est très conceptuelle et bien traitée au Muséum. Vous les étudiants, vous êtes assez bien immergés sur aspect-là. Ce qui manque, c'est un peu ce que tu disais à l'instant. Comment c'est décliné et comment ça se retrouve. Il y a une histoire des idées extrêmement riche mais en fait on la retrouve dans la biologie évolutive moderne, y compris dans la génomique. Je trouve que ce qui manque, c'est d'expliquer, de décortiquer en quoi Darwin est vraiment d'actualité. Je trouve que c'est intéressant. Il y a des outils géniaux en train d'être développés qui permettent de revisiter ces vieilles idées. C'est passionnant.*

Véronique Barriel : *Je voudrais revenir sur un point que tu as souligné Guillaume qui est l'enseignement avant master. Il y a aussi le secondaire. J'ai pu le voir récemment. Des élèves qui choisissent de faire un parcours scientifique peuvent faire une première S ou une terminale S par exemple sans prendre SVT mais une filière où ils n'avaient plus de biologie depuis la seconde. Demander à des élèves d'avoir des souvenirs de ce qu'ils ont fait de l'heure de SVT qu'ils avaient par semaine, ou une heure et demie en seconde, c'est peut-être beaucoup. Ce qu'il faut bien se rendre compte c'est que dans n'importe quelle formation, n'importe quel endroit, n'importe quelle université, il y a eu des soucis dans l'enseignement de la biologie. Je crois que c'est en train de revenir. Que la biologie reprend une place qu'elle avait un peu perdue. Il va y avoir des manques partout nécessairement. On revient par exemple sur la génétique des populations. Je suis tout à fait ouverte qu'il y ait un nouveau module qui se crée et qui soit proposé aux étudiants. Mais en fonction des interlocuteurs, il y a des manques qui dépassent ça. Il y a des gens qui vont dire par exemple, les étudiants de master SEP n'ont aucune base en géologie. Oui, ceux qui viennent d'une licence de bio ont fait moins de géol, de stratigraphie. On pourrait avoir pléthore d'UE. Je reviens sur le stage. J'ai pu encadrer un étudiant qui voulait travailler sur la phylogénie morphologique. Je ne sais plus pour quelle raison, il n'avait même pas suivi mon UE de morphologie cladistique. Il a fallu que je le forme pendant le stage, mais ça faisait partie du stage. Ce qui est important, c'est que face à tous ces manques qui peuvent être identifiés, il existe, d'après tout ce qu'on a vu ce matin, des ressources qu'on pourrait proposer aux étudiants en leur disant : « il y a une liste de formations disponibles sur le site moodle du Muséum pour les enseignants qui pourrait servir à compléter votre formation ». Il faut voir sous quelle forme leur proposer, avec des crédits associés, que sais-je. On peut faire une formation sur l'épigénétique par*

exemple. Actuellement, il n'y a pas une UE qui s'appelle épigénétique dans le master. S'il y a moyen de proposer cette formation, en complément, ça me semble plus important que de dire il va manquer ça. Il manquera toujours quelque chose. On a suffisamment de ressources exploitables et disponibles. J'ai vu ce matin que le directeur du département Origines et Evolution était présent. C'est également un souhait qui a été manifesté par les différents directeurs de départements qu'il y ait des actions transversales entre les métiers, entre les activités. Au sein du département Origines et Evolution, s'emparer du deuxième mot évolution et voir ce qui peut être fait, proposer une action transversale entre différents métiers, les partenaires et faire un constat : il manque ça, qui est d'accord pour faire une formation ?

Guillaume Lecointre : *D'accord avec le niveau département pour lancer les dialogues intermétiers de manière à promouvoir l'évolution dans ses différents aspects.*

Stéphanie Targui : *C'est exactement ce que je voulais dire. Je pense effectivement que c'est une très bonne idée que cet élan, cette initiative parte des départements.*

Laurent Palka : *J'ai le sentiment que la journée scientifique de la SECM évolue. C'est la première fois depuis 2010 que celui qui est derrière la caméra pose une question !*

II. L'évolution dans la recherche, l'expertise et les collections au Muséum

1. *Evolution des formes et des couleurs chez les papillons Morpho: des collections au terrain* par Vincent Debat⁵³, Maître de conférences

C'est un plaisir d'être là aujourd'hui et de vous présenter une partie des travaux que l'on mène dans notre équipe. C'est un plaisir car quand j'étais petit, j'adorais les papillons du genre *Morpho* (ou morphos, voir figure 8 page 48), c'était un peu mon rêve de travailler dessus. Il est donc réalisé. Voilà pour le côté un peu sentimental, mais je vais vous montrer que c'est un groupe quand même intéressant scientifiquement. Je vais parler de l'évolution de la forme des ailes chez ces papillons et du vol. C'est un exemple de recherches qui combinent l'étude des collections et l'étude de terrain comme le titre l'indique.

J'imagine que vous les connaissez plus ou moins. C'est un groupe très emblématique de l'Amérique du Sud. Les morphos sont connus en premier lieu par la couleur bleue iridescente de certaines espèces. Le genre *Morpho* est assez petit. On a 30 espèces connues. Vous voyez que les morphos ne sont pas tous bleus. Il y a une grande variation dans les patrons de coloration. Mais je ne vais pas vous en parler aujourd'hui. Je vais me focaliser sur les formes d'ailes. Les morphos sont de grands papillons. L'espèce la plus grande mesure une quinzaine de cm d'envergure. On a aussi une diversité de formes des ailes. On s'est posé la question de savoir quelles sont les déterminants de l'évolution de cette diversification des formes d'ailes dans ce genre. Dans un premier temps je vais parler de l'évolution des formes et ensuite je vous parlerai du vol.

Ce sont des travaux que l'on a initiés dans le cadre de la thèse d'un étudiant de l'équipe, Nicolas Chazot, et que l'on poursuit depuis. Dans un premier temps, on a mis à jour la phylogénie des espèces du genre *Morpho*. On a reséquencé et analysé un certain nombre de gènes. La topologie de la phylogénie est bien stabilisée. On a deux espèces à la base, ensuite deux clades, l'un avec 18 espèces et celui-là avec 10 espèces. La question que l'on s'est posée est est-ce qu'il y a du signal phylogénétique dans la forme de l'aile, c'est-à-dire est-ce que la diversification de la forme des ailes suit la phylogénie ? Des espèces proches dans la phylogénie ont-elles des formes d'ailes plus proches que celles d'espèces plus éloignées dans la phylogénie ? Le signal phylogénétique correspond, même s'il y a différents paramètres

⁵³ V. Debat est membre de l' UMR 7205 Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB, MNHN/CNRS/SU/École pratique des hautes études/Université des Antilles.

pour l'estimer, à un modèle d'évolution brownien⁵⁴. C'est une hypothèse nulle de diversification. L'autre hypothèse que l'on a testée est de savoir s'il y avait un effet des microhabitats sur la forme des ailes de ces morphos. Comme microhabitat, on oppose canopée et sous-bois. On a des papillons qui volent très haut dans la strate verticale forestière, dans un milieu de canopée très ouvert, avec des conditions d'ensoleillement particulières mais aussi des guildes⁵⁵ de prédateurs différentes de ce que l'on peut rencontrer en sous-bois, milieu très fermé avec des contraintes vis-à-vis du vol très différentes de celles de la canopée. On s'est posé la question de savoir s'il y avait une divergence adaptative entre ces microhabitats.

On a utilisé la plus grande collection au monde, celle du Muséum, ou en tout cas l'une des plus grandes. On a pris des photos et digitalisé des points de repères pour quantifier la forme des ailes d'un millier à peu près de spécimens de la collection. Ce sont des méthodes de morphométrie géométrique. Pour quantifier la forme, on détermine des points de repères sur les ailes, à l'intersection entre les nervures et le bord de l'aile. C'est ce que l'on appelle des points homologues, des landmarks. Sur le pourtour on a des semi-landmarks qui n'ont pas d'homologie aussi précise que les vrais landmarks mais qui nous permettent de décrire à la fois la position des nervures et le contour des ailes. On a fait ça pour les ailes antérieures et postérieures de ces mille individus mâles et femelles pour les 30 espèces. Une fois que l'on a digitalisé ces points de repères, on va essayer d'éliminer l'information parasite. On va s'affranchir des différences de configurations de points qui sont liés à des différences de taille, de position et d'orientation. Ca se fait en superposant les configurations. C'est ce qu'on appelle la superposition procruste. Après cette étape de superposition, les coordonnées de ces points que l'on a digitalisés, considérés tous ensemble, nous fournissent des variables de forme qui permettent de décrire la morphologie des ailes. Ce sont des variables que l'on entre dans des statistiques multivariées qui nous servent d'outils d'analyses. Dans ce graphique, c'est une analyse en composante principale dans laquelle je ne fais figurer que les moyennes par espèce, pour améliorer la lisibilité. Chaque point du graphique correspond à la description d'une forme. Plus deux points sont proches plus les formes d'ailes correspondantes sont proches également. On voit que ce morpho-espace est très structuré par l'opposition entre les points bleus et les points verts, c'est-à-dire entre les espèces de canopée et les espèces de sous-bois. Il y a donc une grande divergence de formes dans les deux microhabitats.

⁵⁴ Dans le modèle d'évolution brownien, la distribution randomisée (au hasard) inclut les données observées.

⁵⁵ En écologie, une guilda est un groupe d'espèces, pas nécessairement proches taxonomiquement, qui exploitent un même type de ressources, le plus souvent alimentaire.

Ce type d'approche morphologique géométrique nous permet également de combiner les données de phylogénie. On peut reconstituer les valeurs de forme au nœud de l'arbre, et projeter l'arbre dans le morpho-espace et tester l'impact de la phylogénie sur cette structuration phénotypique de l'espace des formes. Vous voyez très clairement que pour les ailes postérieures, il y a une forte structuration de l'espace par la phylogénie. Je ne vous ai pas donné la valeur de la statistique mais on a un signal phylogénétique très fort qui correspond à ce que je vous ai dit. Des espèces phylogénétiquement proches le sont également les unes des autres dans ce morpho-espace. Mais ce qui est plus intéressant à mon avis c'est que la divergence entre canopée et sous-bois, qui matche la phylogénie, est plus forte que l'attendu neutre d'une évolution brownienne. On a une divergence entre canopée et sous-bois plus forte que ce à quoi on s'attendait à partir d'une évolution neutre le long des branches de la phylogénie. Ce qui suggère que cette divergence serait un pic des phénomènes d'adaptation. Même analyse pour les ailes antérieures, mais on ne voit pas aussi bien que pour les ailes postérieures l'opposition canopée sous-bois. C'est lié au fait que l'on projette en 2D quelque chose qui est multidimensionnelle. En fait, la divergence se fait dans d'autres directions que sur ce premier plan. Mais là aussi on a une divergence canopée sous-bois qui est supérieure à ce que l'on s'attendrait selon un modèle neutre d'évolution brownienne.

On a ensuite regardé la covariation entre l'aile antérieure et postérieure, en combinant les deux indices que je vient de vous montrer. C'est une analyse qui examine de façon spécifique la part de covariation entre les deux ailes. Cette covariation est fortement tirée par l'opposition entre espèces de canopée et de sous-bois. Chez les espèces de canopée, on a des ailes typiquement de forme triangulaire, plus allongée que les ailes des espèces de sous-bois qui sont plus arrondies, plus trapues. On peut le résumer sur cette diapo synthétique où sont représentées la phylogénie, la distribution des espèces de canopée et de sous-bois et les formes correspondantes. Si on montre ça à des gens qui font de l'aérodynamique, ils disent tout de suite que des ailes allongées de ce type-là maximisent la capacité à faire du vol plané. Au contraire, des ailes plus courtes, plus trapues sont quelque chose que l'on prédit pour une sélection sur un vol battu manœuvrable. Ça colle bien avec l'idée qu'on a de l'écologie puisqu'on a des espèces qui planent en milieu ouvert versus des espèces qui zigzagent dans un milieu fermé. C'est le résultat principal de cette étude de morphologie, mais qui nécessite évidemment une validation sur le terrain en condition naturelle et la quantification des paramètres de vol de ces papillons.



Fig. 8. Installation de terrain au Pérou pour l'étude du vol des morphos
© Vincent Debat

C'est ce qu'on a fait et que je vous présente maintenant. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la thèse de Camille Le Roy qui est au labo sur l'évolution du vol chez les morphos. On est allés dans la région de Tarapoto, au nord du Pérou (figure 8). C'est un hotspot de biodiversité. Chez les morphos, il y a jusqu'à 14 espèces quasiment en sympatrie⁵⁶. On est allés à la chasse aux papillons avec nos filets. On a pu échantillonner trois espèces de canopée et huit espèces de sous-bois qu'on a placées dans une cage de vol que l'a construite dans la forêt qui faisait à peu près huit mètres de long, trois mètres environ de large et de haut, donc suffisamment grande pour espérer faire voler des grands papillons comme les morphos. Concrètement, on a déposé trois caméras haute vitesse à l'intérieur de la cage et on a fait ce type de film. J'adore. Ca correspond vraiment à ce que je rêvais de faire. C'est vraiment beau à voir voler.

A partir de ces films, on soustrait le background et on extrait les trajectoires de vol correspondant à chaque angle de vue. Ensuite on les combine. On calibre l'espace et on combine ces différentes vues pour reconstruire la trajectoire de vol en 3D. Ce que l'on peut faire à partir de ça, c'est de positionner les battements vers le haut et vers le bas. On peut extraire, différencier, quantifier la durée des phases de vol plané, de vol battu. Ce sont les choses les plus simples. Après on peut extraire plein de choses, au-delà de la fréquence de

⁵⁶ Qui coexistent dans une même zone géographique.

battements. On peut mesurer la vitesse, l'accélération, l'accélération angulaire, la sinuosité du vol, un ensemble de paramètres qui permettent de caractériser les comportements de vol. J'insiste là-dessus. Ce n'est pas de la performance de vol, ce n'est pas non plus de l'aérodynamique proprement dit. A partir de cette série de variables qu'on a quantifiées pour chacun de ces vols pour chaque individu des différentes espèces, on va les traiter de la même façon que les données morphométriques, avec l'arsenal des statistiques multivariées. On construit des espaces multivariés de ce type-là où chaque point correspond au vol d'un individu. On peut regarder dans quelle mesure les espèces ont des vols différents. Ce n'est pas aussi claire que pour l'analyse morphométrique. En abscisses, ici à droite on a les espèces qui volent le plus vite, à gauche ce sont celles qui ont une trajectoire assez sinueuse. Le deuxième axe oppose les espèces qui planent beaucoup à d'autres qui au contraire font un vol battu très rapide. On a une structuration avec d'un côté sept espèces de sous-bois, au milieu on a les 3 espèces de canopée et de l'autre côté, une petite espèce qui vole beaucoup plus doucement et de façon sinueuse. Donc la structuration est moins claire que ce qu'on avait sur la forme des ailes mais qui est quand même présente.

Ensuite, on a regardé s'il y avait une association entre la forme des ailes et les paramètres de vol. Le résultat que je montre est sur la première composante, la première direction de covariation entre la forme des ailes et le vol. En cercles pleins foncés, ce sont les espèces de sous-bois et les cercles clairs les espèces de canopée. On a 5 espèces de sous-bois qui se regroupent à droite, trois autres plus petites se retrouvent avec 2 espèces de canopée à gauche et 1 espèce qui a les ailes hyper allongées au milieu. Si on regarde ce qu'il se passe sur le deuxième axe de covariation, on a un effet qui isole complètement cette espèce aux ailes hyper allongées qui vole de façon très différente de toutes les autres. Que dire de ces résultats ? En fait, la structuration est plus complexe que ce que l'on pouvait supposer avec notre opposition binaire canopée sous-bois. On retrouve cette opposition avec 5 espèces de sous-bois qui présentent un vol puissant avec une alternance de vol battu et vol plané et 2 espèces de canopée qui planent énormément et que l'on retrouve avec 3 petites espèces de sous-bois mais qui volent de façon assez similaires que ces grandes espèces de canopée. On trouve à l'opposé cette espèce-là qui ne vole pas du tout de façon prédite, c'est l'espèce qui a les ailes les plus allongées. En fait, elle ne plane jamais. Elle passe son temps à faire du vol battu extrêmement puissant.

J'en arrive à la conclusion. Notre analyse de la forme des ailes suggère un signal adaptatif, une divergence adaptative sur cette forme des ailes. Nos analyses d'association forme-vol suggère que la réalité serait plus complexe que ce qu'on pouvait prédire à partir de l'opposition binaire canopée-sous-bois et ouvre des perspectives. Aller décortiquer de façon plus précise les effets aérodynamiques de la forme des ailes. Ce sont des choses que l'on fait avec des physiciens, à la fois ici à l'ESPCI (Ecole supérieure de physique et de chimie) et avec des collègues en Hollande. Ce sont des gens qui font de la modélisation *in silico* des quotients de trainées, des forces qui s'exercent au cours du vol plané mais aussi du vol battu sur les formes qu'on leur donne. Ça amène aussi à améliorer nos connaissances sur l'écologie. La réalité est plus complexe que ce qu'on pouvait subodorer à partir des connaissances limitées que l'on a. C'est quelque chose qui m'a beaucoup surpris. Quand j'ai commencé à travailler sur les morphos, je pensais, étant donné que ce sont des papillons très célèbres, collectionnés pour leur valeur marchande depuis plusieurs siècles, que c'était un groupe bien connu. En fait, on connaît rien sur l'écologie. On commence à accumuler des connaissances et à chaque fois que l'on trouve quelque chose, c'est vraiment nouveau. Nos résultats suggèrent aussi l'importance de l'analyse conjointe avec la couleur puisque l'on pense qu'une des pressions de sélection principale, qui porte sur le vol des morphos, est la sélection par les prédateurs. Il y a évidemment une interaction directe avec la couleur. Dans quelle mesure ils sont détectés, perçus par les prédateurs ? Je vous ai montré des morphos bleus. Ils sont bleus sur la face dorsale mais marrons et très cryptiques sur la face ventrale, de sorte qu'en vol battu il y a une alternance de bleu super visible, un flash de lumière, et de marron quand ils referment les ailes. Ils disparaissent et se fondent dans l'environnement. En fait ils ont un vol qui clignote ce qui pour nous, prédateurs humains, les rend très difficiles à attraper en vol. On imagine que c'est un aspect aussi important vis-à-vis des prédateurs.

2. Evolution de l'Homme, apports de la génétique moderne par Laure Ségurel⁵⁷, Chargée de recherche CNRS

J'ai choisi de vous présenter plusieurs illustrations plutôt qu'un cas précis de ce que l'on fait au laboratoire, particulièrement dans mon équipe. Je travaille au musée de l'Homme où il y a deux UMR qui appartiennent au département « Homme et environnement ». L'UMR Eco-anthropologie à laquelle j'appartiens et l'UMR Histoire naturelle de l'homme préhistorique. Il

⁵⁷ En 2019, L. Ségurel était membre de l'UMR 7206 Eco-Anthropologie au Musée de l'Homme. Elle a intégré l'UMR 5558 Biométrie & Biologie Evolutive à l'université Claude Bernard Lyon 1 en septembre 2020.

Il y a aussi trois plateaux techniques. Un plateau d'imagerie et modélisation 2D/3D surtout pour faire du scan de crânes ou d'autres objets et un plateau de paléogénomique et génétique moléculaire où l'on peut traiter l'ADN ancien comme l'ADN moderne. Ces deux plateaux sont rattachés à l'UMR d'éco-anthropologie. Le troisième est un plateau de datation et caractérisation des matériaux archéologiques et sédimentaires rattaché à l'UMR de préhistoire. Mon UMR comporte six équipes : 1) Une équipe intitulée Diversité et évolution culturelle (DivEC) s'intéresse à l'évolution culturelle, à la diversité de différents facteurs culturels et leur évolution ; 2) Une équipe d'ethnoécologie : savoirs, pratiques, pouvoirs (Esp) est plus à l'interface entre société et environnement ; 3) Une équipe de primatologie intitulée Interactions primates et environnements (IPE). Et puis trois équipes qui sont plus à l'interface entre société et biologie : 4) une équipe d'anthropologie biologique et bio-archéologie (ABBA) ; 5) une équipe de biodémographie (BioDém) et 6) l'équipe d'anthropologie génétique (AGène) à laquelle j'appartiens. Le but de l'équipe d'anthropologie génétique est de comprendre toutes les forces évolutives qui façonnent la diversité génétique humaine. Pas tellement la mutation et la recombinaison même si ce sont évidemment les forces qui créent la diversité. On s'intéresse surtout aux forces de migration et de dérive qui dépendent de l'histoire démographique des populations et à la force de la sélection naturelle qui influence la diversité génétique à travers le phénotype, donc qui dépend de l'histoire adaptative des populations. C'est le cadre général de la génétique des populations de manière assez large. Ce qui va faire la spécificité de notre équipe en anthropologie, c'est le fait que l'on s'intéresse à l'influence de la diversité culturelle sur ces forces. En quoi le fait que les populations ne font pas les mêmes choix culturels, la manière dont les gens se marient, la manière dont ils migrent, la manière dont ils se nourrissent, etc. En quoi cette diversité culturelle va affecter à la fois l'histoire démographique et l'histoire adaptative.

J'ai travaillé sur trois axes de recherche. Le premier axe est l'histoire démographique. Son but est de retracer des voies de peuplements, des taux de migrations, des taux de métissage entre populations, de dater à quel moment les populations se sont déplacées et se sont mélangées. Le deuxième axe concerne l'histoire adaptative, pour comprendre d'un point de vue physiologique ou génétique, comment les populations humaines ont évolué en réponse à des changements d'environnement, qui peuvent être des changements climatiques mais surtout alimentaires. Le troisième axe est peut-être un petit peu fourre-tout avec des projets plus diversifiés dans le cadre de l'interaction biologie-culture. Cet axe s'intéresse à l'influence de traits culturels sur la diversité biologique, comme les deux autres. Ça peut être par exemple

l'influence des systèmes de parenté, on en parlera un peu, sur la diversité génétique. Des projets se sont aussi développés sur l'influence de traits culturels sur la diversité épigénétique ce qui est un peu plus nouveau au labo. Et puis on s'intéresse à l'évolution parallèle de traits génétiques et culturels où l'on essaie de d'appliquer tous les outils et les méthodes, qui permettent de comprendre l'évolution moléculaire, à des traits culturels, par exemple l'évolution de traits linguistiques ou de la diversité musicale.

Ces trois axes nécessitent de récupérer des données sur lesquelles on va travailler. La plupart sont des données issues d'échantillons prélevés nous-mêmes comme de la salive pour avoir accès à l'ADN des populations humaines. Les principaux terrains du labo sont l'Afrique centrale, l'Asie centrale, du Nord et du Sud-Est. On peut monter des projets sur des données déjà existantes ou compléter nos jeux de données avec celles-ci. Des populations ont été échantillonnées à travers le monde et génotypées à l'échelle du génome entier. Je parle surtout d'ADN moderne puisqu'il y aura la présentation de Perle après moi. On peut aussi compléter ces données d'ADN moderne par des données d'ADN ancien. Soit on les collecte nous-mêmes sur des fouilles en cours ou à venir, soit dans des collections déjà existantes. En dehors de cette analyse de données réelles, on a aussi une grande composante au laboratoire d'analyses de données simulées ou en tout cas de développement d'outils méthodologiques où on simule des scénarios démographiques ou adaptatifs pour essayer : soit de développer des outils qui vont être plus performants pour essayer de retracer l'histoire démographique et adaptative ; soit de tester des méthodes et voir quelle est leur puissance, leur performance dans différents scénarios ; soit simplement de simuler des données selon plusieurs scénarios qui nous intéressent pour les confronter à nos données et voir quel scénario est le plus probable. Je vais essayer de vous donner des petites illustrations de tout ça à travers cinq thématiques.

Je voudrais parler maintenant d'un article sorti en 2009 qui retrace un peu mon parcours puisque c'est le type de données avec lesquelles on travaillait il y a dix ans. Dans cet article, mon collègue Paul Verdu s'est intéressé aux populations pygmées et non pygmées en Afrique de l'Ouest à l'échelle du Cameroun et du Gabon. Il a échantillonné 600 individus. A l'époque il avait typé 28 marqueurs microsatellites autosomaux⁵⁸, ce qui n'est pas un jeu de données très conséquent au vu de ce que l'on fait maintenant chez l'Homme. La question principale

⁵⁸ Un microsatellite est une séquence de quelques nucléotides qui se répète dans le génome et qui se transmet selon les lois de l'hérédité. Autosome signifie que le microsatellite se trouve sur un chromosome non sexuel.

était de savoir est-ce que toutes les populations dites pygmées, sans rentrer dans le détail, ont une origine commune génétiquement ou pas ? Des scénarios hypothétiques ont été simulés. Les populations pygmées ont une origine commune puis divergent, se séparent et donnent lieu à la diversité actuelle. Un scénario alternatif est celui-là où en fait les populations pygmées se séparent de la branche des non pygmées à différents moments dans le temps, donc indépendamment, sans avoir d'origine génétique commune. Paul Verdu avait simulé dix scénarios possibles avec des variantes dans la topologie de l'arbre phylogénétique et différents taux de migrations ensuite entre les populations. Le résultat principal de son étude était qu'effectivement la topologie la plus probable est d'avoir une branche pygmées qui se sépare des non pygmées puis qui se sépare à nouveau en pygmées de l'Est et pygmées de l'Ouest pour donner la diversité actuelle. Il y aurait donc bien une origine commune des populations pygmées. Les flux de migrations retracés étaient toujours asymétriques, de non pygmées vers pygmées. Ceci s'explique quand on connaît les systèmes matrimoniaux, vu que lorsqu'il y a des couples mixtes pygmées non pygmées, les enfants sont souvent élevés par les pygmées. Donc en fait il n'y a pas de flux des pygmées vers les non pygmées, mais plutôt dans l'autre sens.

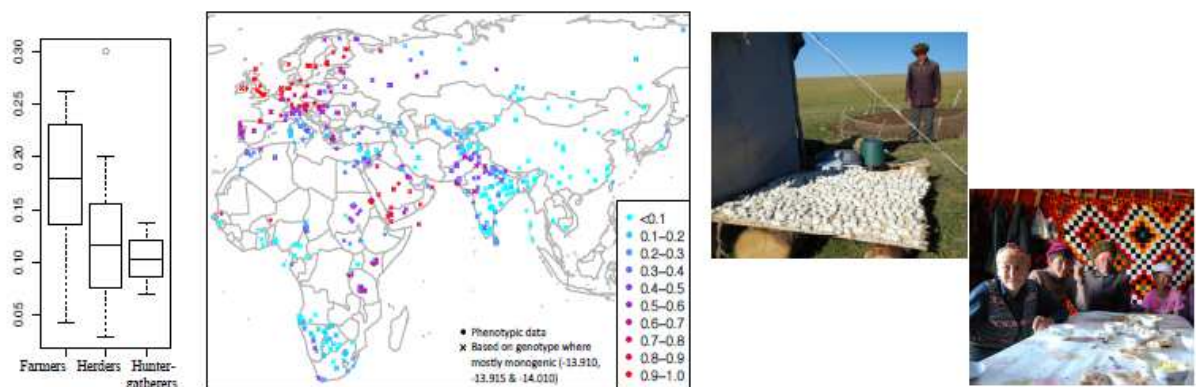
Je vous présente ici un autre projet de recherche sur l'histoire démographique mené encore une fois par Paul Verdu et l'ANR qu'il avait obtenue il y a quatre ans. Paul s'est intéressé aux populations du Cap Vert, dans des régions qui ont été peuplées assez tard, par des populations à la fois d'origines européennes, et africaines lors de la traite des esclaves. Il y a eu un peuplement récent, à peu près vers l'an 1500, et mixte avec des origines différentes. Il a essayé de comprendre quelle était l'histoire de la colonisation de ces îles qui avait entraîné la diversité génétique et linguistique observée aujourd'hui. Il a échantillonné plus de 200 individus et typé 2,5 millions de SNP⁵⁹ sur des puces à ADN. Il est passé alors à une autre échelle en termes de taille de jeux de données. Il a fait également des enquêtes d'anthropologie et de linguistique pour mettre en parallèle l'évolution génétique et linguistique. Il a rajouté 17 populations issues de jeux de données comme ceux que je vous ai montrés pour pouvoir inférer (déduire) les populations sources en Europe et en Afrique. Il a effectué des analyses statistiques comme ici avec une MDS⁶⁰ pour regarder où se positionnent les populations de chaque île. Il a fait aussi des analyses de structure où il regardait dans les

⁵⁹ Les SNP (single nucleotide polymorphism ou polymorphisme d'un seul nucléotide) sont les variations génétiques les plus abondantes dans le génome humain (90% de toutes les variations).

⁶⁰ Multidimensional Scaling : méthode qui permet de passer d'une matrice de similarité, dissimilarité ou dissemblance entre individus aux coordonnées de ces mêmes individus dans un espace de dimension réduite.

populations du Cap Vert quelle était la source la plus probable parmi les populations d'Europe ou d'Afrique. Il a trouvé que ça récapitule assez bien ce que l'on sait de la traite des esclaves avec une arrivée précoce des îles du Nord, ensuite plus tardive des îles du Sud, une origine surtout de l'Europe de l'Ouest et de l'Europe de l'Est. On peut même aller plus dans le détail en essayant de regarder de quel pays majoritairement sont issues les populations qui ont colonisé ces endroits. Il a trouvé trois groupes d'îles et simulé différents scénarios possibles pour obtenir des dates assez précises.

Comme je l'ai dit, ce qui nous intéresse beaucoup c'est l'adaptation aux changements alimentaires des populations humaines, notamment lors de la révolution néolithique, c'est-à-dire la transition vers l'agriculture et l'élevage. On a effectué une approche gène candidat⁶¹, sur des gènes du goût, de détoxification, de digestion des sucres, de digestion de la viande et du lait et regardé chaque fois quelles populations ont des traces de sélection naturelle, à quel moment et à quoi ça correspond exactement comme changement alimentaire. Je me suis intéressée à la datation de la consommation de lait, qui est un exemple assez bien connu (figure 9).



- Génotypage de 900 ind dans 27 pops (Mongolie, Kirghizistan, Sibérie, Ouzbékistan)
- Faible persistance de la lactase (14.5%), pas d'effet du mode de vie ancestral

Fig. 9. Adaptation génétique des populations à la consommation de lait © Laure Séguérel

Les populations humaines se sont adaptées à consommer du lait à l'âge adulte au moment de la révolution néolithique. Je me suis intéressée à l'Asie centrale. Ici en rouge la prévalence d'individus qui digèrent le lait à l'âge adulte. Plus c'est rouge et plus la population est lactase persistante. On voit qu'il y a une adaptation génétique en Europe, en Arabie, à

⁶¹ Méthode qui consiste à rechercher et analyser les variants génétiques dans des gènes impliqués ici dans l'alimentation.

différents endroits en Afrique. Mais la question que l'on s'est posée est : que se passe-t-il en Asie centrale puisqu'il y a dans ces régions des éleveurs de steppes qui consomment beaucoup de produits laitiers ? Pourtant dans la littérature il n'y a rien sur l'adaptation génétique de ces populations. A force d'échantillonner, j'ai fini par obtenir une base de données de 900 individus dans 27 populations, en Mongolie, Sibérie, Ouzbékistan et au Kirghizistan. Le résultat est complètement bleu. Dans ces populations-là, il n'y a pas d'adaptation génétique pour digérer le lait à l'âge adulte. Quand on regarde le mode de vie, c'est même les agriculteurs qui ont une prévalence un peu plus importante que les éleveurs et les chasseurs cueilleurs. En moyenne c'est une prévalence de 14% de lactase persistance, c'est-à-dire que 14% des individus sont capables à l'âge adulte de digérer le lactose présent dans le lait. On présume que les autres ont des symptômes type diarrhées, crampes abdominales, etc. s'ils boivent une trop grande quantité de lait frais. On a imaginé deux possibilités. Soit ces populations se sont faites remplacer souvent et peut-être récemment, puisqu'on est dans un endroit en Asie centrale, où il y a eu des migrations d'ouest en est, et d'est en ouest assez conséquentes en termes démographiques. Peut-être que ces populations n'ont pas eu suffisamment de temps pour s'adapter. On peut imaginer qu'elles se sont faites complètement remplacer par des populations est-asiatiques qui n'étaient pas des populations d'éleveurs. Ou alors on peut imaginer un scénario d'adaptation culturelle et pas génétique, car ces populations semblent ne pas consommer du tout de lait frais. Elles ne consomment que du lait fermenté soit sous forme de yaourt soit sous forme d'alcool de lait, soit sous forme de fromage. Au final, le contenu en lactose est un peu différent et surtout, les populations ingèrent en même temps que le lait les bactéries qui vont digérer le lactose. Ce sont les deux hypothèses que l'on a proposées.

Je voudrais vous montrer comment on a utilisé des données d'ADN ancien dans ce contexte. Sur cette diapo, ce sont des bases de données qui existent de différents individus. Chaque point est un individu pas une population et pour chaque individu, on va regarder s'il porte la mutation qui permet de digérer le lactose. On est à peu près au début du néolithique, entre -10 000 et -5000 ans. On a trouvé un seul individu capable de digérer le lactose. Au moment de l'âge de bronze, de -5000 à -3000 ans, on commence à voir plusieurs individus qui en sont capables, à la fois en Europe et en Asie. Par contre, à l'âge du fer, de -3000 à -100 ans, c'est vraiment en Europe que ça augmente en fréquence. En Asie, il ne se passe pas grand-chose. La mutation est présente mais n'augmente pas en fréquence. Les fréquences observées aujourd'hui correspondent finalement assez bien à ce qui se passait déjà à l'âge du

fer. Ce qui nous fait dire qu'il n'y a pas eu forcément un remplacement de populations. Le fait que la mutation était déjà présente et qu'elle n'a pas augmenté en fréquence penche plutôt pour un scénario d'adaptation culturelle.

On ne travaille pas que sur l'homme directement. Je me suis intéressée au microbiome intestinal pour voir l'effet de ces changements alimentaires. Est-ce que les bactéries intestinales pouvaient nous donner de l'information sur la manière dont elles nous permettent de nous adapter à des changements de mode de vie. La question était un peu différente. En fait, ce sont des changements de mode de vie très récents, de type industrialisation, urbanisation, quand les populations humaines changent de type d'environnement et de nourriture. Comment les bactéries intestinales s'adaptent à ces changements de régime alimentaire ? Ici c'est une ACP⁶² sur la composition des bactéries intestinales. On sait qu'il y a une grande différence entre des populations industrielles habitant aux Etats-Unis, et des populations traditionnelles habitant au Malawi ou au Vénézuéla. Ceci a été montré dans beaucoup d'autres travaux. A chaque fois, il y a une perte de diversité des bactéries intestinales dans les populations urbaines fortement industrialisées. La question est pourquoi ces populations ont perdu des bactéries intestinales ? Est-ce parce que les populations mangent moins de fibres ? Est-ce parce qu'elles ont des pratiques médicales type antibiotiques, césarienne, etc., qui réduisent la diversité des bactéries ? Est-ce parce qu'il y a une meilleure hygiène ? Est-ce que c'est parce que les populations changent de type d'habitat ? Est-ce parce qu'elles changent de latitude entre ces environnements ? Il y a beaucoup de facteurs confondants. L'idée était de faire un peu le tri en étudiant un gradient d'urbanisation.

En 2013, on a étudié des individus ruraux, chasseurs cueilleurs, pêcheurs et agriculteurs, et en 2017, on a collecté des données chez des individus ruraux, semi-urbains et urbains. A chaque fois, on a récolté de la salive pour avoir accès à l'ADN humain mais surtout de la matière fécale pour les bactéries intestinales, des données anthropométriques et beaucoup de données culturelles. Ce que les gens mangent, quels types de médicaments ils prennent, différents facteurs socio-économiques. On a trouvé qu'il y avait peu de différences en fonction du mode de subsistance. Que les individus soient chasseurs cueilleurs ou agriculteurs ne changeait quasiment rien dans les bactéries intestinales. Il n'y avait pas une grande perte de

⁶² L'analyse en composantes principales est une méthode statistique qui consiste à transformer des variables corrélées en variables décorréées, ces nouvelles variables devenant des composantes principales ou axes principaux.

diversité entre les milieux rural et urbain. Pourtant on a montré qu'ils avaient des différences alimentaires importantes. Ce que ça semble dire, c'est que ce serait plutôt les pratiques médicales ou le type d'habitat qui sont les plus influents. En tout cas, l'alimentation change clairement entre le milieu rural et le milieu urbain, mais la diversité des bactéries intestinales ne varie pas, même s'il y a une modification en termes de composition.

Une dernière illustration sur les systèmes de parenté comme je vous disais au début. C'est à la fois les systèmes de filiation : c'est-à-dire est-ce que j'appartiens à une unité culturelle qui est celle de mon père ou de ma mère ? Ensuite il y a les choix de résidence : est-ce que je vais habiter dans le village de mon mari ou est-ce que mon mari va habiter dans mon village, ou est-ce que c'est le même pour les deux ? Enfin les choix d'alliance : avec qui j'ai le droit de me marier ou pas dans ma population ? Ca va évidemment beaucoup influencer la diversité génétique et donc également les niveaux de consanguinité des populations humaines. Raphaëlle Chaix (chargée de recherche CNRS) a obtenu une ANR pour travailler en Asie du Sud-Est où vous voyez qu'il y a trois systèmes culturels différents. Des populations matrilineaires⁶³ matrilocales⁶⁴, des populations cognatiques⁶⁵ et des populations patrilineaires patrilocales. Sans entrer dans le détail, en gros ces populations sont très diversifiées dans leur manière de gérer où les gens habitent, quel partenaire ils choisissent et comment ils héritent l'identité culturelle. Elle a pu montrer qu'il y avait une signature génétique : on peut retrouver dans les données génétiques si les populations ont un système patrilineaire ou matrilineaire ce qui ouvre des perspectives aussi sur l'ADN ancien, pour inférer les systèmes de parenté passés. Voilà, je remercie tous les collègues à qui j'ai pris des résultats à droite et à gauche, actuellement ou anciennement dans l'équipe.

3. Doctorat sur la paléogénétique des migrations humaines en Asie centrale par Perle Guarino-Vignon, Doctorante

Je suis venue vous parler de mon doctorat car contrairement à tous les intervenants ici, je ne suis pas encore docteur. Je prépare une thèse, dans la même équipe que Laure, qui porte sur l'étude paléogénétique des migrations autour de la mer Caspienne, et plus particulièrement en Asie centrale. Laurent m'a demandé de parler un peu de mon parcours, comment on arrive

⁶³ Signifie que le patrimoine ou le nom de famille s'hérite suivant le lignage de la mère (s'oppose à patrilineaire).

⁶⁴ Les femmes possèdent le lieu d'habitation.

⁶⁵ filiation passant indifféremment par la mère ou le père

à faire un doctorat sur l'évolution humaine et l'impact des migrations, de mes motivations et ce qui fait qu'aujourd'hui j'ai envie de faire de la recherche sur l'évolution humaine.

J'ai commencé après mon bac S par deux ans de prépa BCPST⁶⁶, à l'issue desquels j'ai été reçue aux ENS et j'ai choisi d'aller à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon pour faire de la paléontologie. Parce que l'évolution des espèces dans le passé me passionnait depuis très longtemps. J'ai fait ma licence de géologie à l'ENS de Lyon, puis j'ai commencé mon master de paléontologie et entre le master 1 et le master 2, j'ai passé l'agrégation avant de faire un master 2 de paléontologie. Et là vous vous dites : comment on passe d'un master 2 de paléontologie à une thèse en génétique ? C'est une question légitime. La réponse se trouve en fait dans mes stages parce que très vite je me suis rendu compte que la paléontologie était intéressante mais que la génétique l'était aussi énormément et que ça donnait des clés qui m'intéressaient beaucoup. Dès la L3 j'ai effectué un stage où le but était de séquencer l'ADN ancien d'espèces éteintes de hiboux pour reconstituer leur phylogénie. Pour mon master 2, j'ai fait mon stage dans l'équipe d'Anthropologie génétique AGène avec deux directrices, Evelyne Heyer et Céline Bon, sur de la paléogénétique appliquée à l'Asie centrale. C'est donc mes stages qui m'ont préparée au doctorat et en septembre 2018 j'ai rejoint l'équipe AGène pour travailler sur la démogénétique, dont le but est de reconstituer l'histoire démographique des populations humaines, et sur le terrain d'Asie centrale, qui est la spécialité d'Evelyne Heyer.

Ma thèse, qui porte donc sur l'étude de paléogénétique des populations d'Asie centrale (figure 10), est l'héritière directe de la thèse de Nina Marchi⁶⁷ qui a été soutenue en 2017 dirigée par Evelyne Heyer et Laure Ségurel. La thèse de Nina s'était attachée à étudier la diversité génétique en Asie centrale avec plusieurs axes dont celui d'établir un panorama génétique et le mettre en relation avec des structurations culturelles et linguistiques. Les populations en Asie centrale peuvent se répartir en deux groupes linguistiques. Les populations qui parlent des langues turco-mongoles qui sont majoritaires et les populations qui parlent des langues indo-iraniennes. Ce qui est intéressant c'est que cette séparation, cette dichotomie se retrouve quand on regarde l'organisation sociale, spécifique pour les populations turco-mongols et différente pour les populations de langue indo-iranienne et sur le mode de subsistance. Les populations de langues turco-mongoles sont plutôt des éleveurs

⁶⁶ biologie, chimie, physique et sciences de la Terre

⁶⁷ Marchi, N. (2017) A la croisée de l'anthropologie et de la biologie évolutive : diversité génétique et comportements migratoires en Asie intérieure, MNHN, Paris

semi nomades et les populations de langue indo-iranienne plutôt des agriculteurs sédentaires. Quand on regarde la diversité génétique avec une MDS, qui se lit comme une ACP et représente les distances génétiques entre individus, on voit que la dimension 1 sépare très clairement les populations en rouge ici de langue indo-iranienne des populations de langues turco-mongols. On a donc une diversité génétique distincte entre ces deux groupes. D'autres statistiques et d'autres études ont montré que cela ne représentait pas un gradient mais bien une différence de fond génétique, donc une histoire différente pour ces deux populations. De même un certain nombre de modélisations réalisées par Evelyne Heyer et collaborateurs ont montré que les populations de langue turco-mongole étaient arrivées sur le territoire d'Asie centrale après les populations indo-iraniennes et qu'elles avaient probablement remplacé sur beaucoup de territoires les populations de langue indo-iranienne.

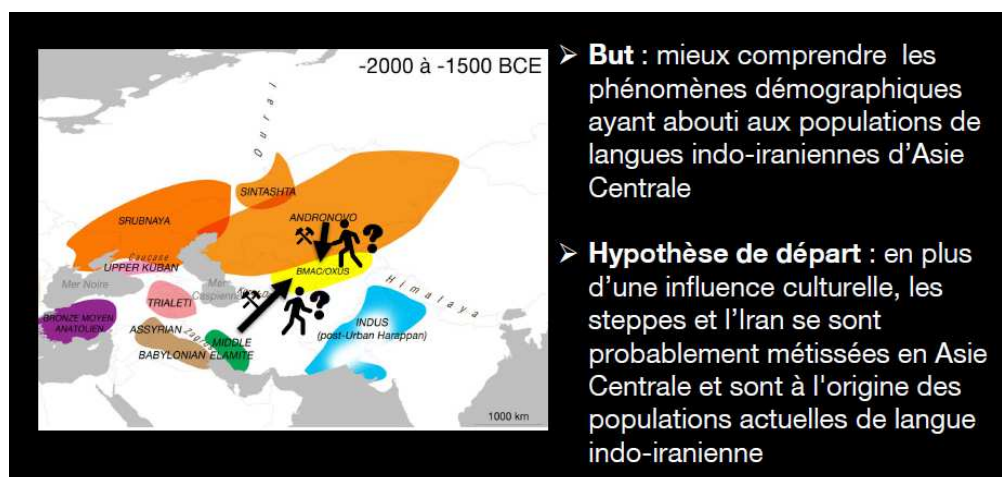


Fig. 10. Thèse de Perle Guarino-Vignon en paléogénétique des migrations humaines en Asie centrale ; but et hypothèse © Perle Guarino-Vignon

A l'issue de toutes ces observations, s'est posée la question : quelles sont les histoires et d'où viennent ces populations ? Plus particulièrement, d'où viennent les populations de langue indo-iranienne ? Quelles sont leurs origines ? Pour faire des hypothèses et commencer des embryons de réponses, on s'est associés avec des archéologues spécialistes de la région, notamment avec Julio Bendezu-Sarmiento qui est spécialiste de la civilisation de l'Oxus⁶⁸. Pourquoi ceci nous intéresse tant ? C'est parce que l'Asie centrale, Laure en a déjà parlé, est une région qui est au cœur de flux de populations et qui est plus particulièrement à l'interface entre deux grandes sphères d'influence, au nord la sphère des steppes et au sud celle du plateau iranien. On parle beaucoup des flux est-ouest avec la route de la soie, les conquêtes

⁶⁸ civilisation majeure du monde oriental protohistorique

des Huns, etc., mais l'axe nord-sud a une énorme influence et cette dichotomie est la plus prégnante durant l'âge du bronze, correspondant à la civilisation de l'Oxus. On retrouve culturellement des artefacts qui font partie de la sphère d'influence du plateau iranien, par exemple ces deux vaisselles en argent. On retrouve aussi une civilisation qui va être composée d'un réseau de cités proto-urbaines avec un système très complexe d'irrigation, une structuration de la société qu'on va retrouver dans les tombes, l'utilisation de tours de potiers, beaucoup de signaux d'une civilisation extrêmement riche. Ce qui est assez intéressant, c'est qu'à la fin de l'âge du bronze, cette société va décliner, en parallèle à des changements environnementaux, essentiellement caractérisés par une aridification du milieu. Ce déclin va se caractériser par deux choses d'un point de vue culturel. La première est l'arrivée de plus en plus d'artefacts caractéristiques des sociétés des steppes du Nord. Essentiellement des artefacts des cultures d'Andronovo⁶⁹ et des cultures associées. Dans le même temps, le changement des pratiques funéraires ; on va avoir pendant la civilisation de l'Oxus des pratiques funéraires qui vont être majoritairement des enterrements alors qu'à la fin de l'âge du bronze et au début de l'âge du fer, pendant le déclin et après la civilisation de l'Oxus, cette pratique funéraire va diminuer pour laisser la place à une autre qui consiste à exposer les corps à l'air libre aux charognards. Cette pratique-là est étroitement associée avec la religion mazdéiste⁷⁰ qui est supposée être issue d'un foyer dans le plateau iranien. Il semblerait qu'à la fin de l'âge du bronze on ait cette double influence, du nord avec l'arrivée d'artefacts des cultures Andronovo et d'une religion plutôt caractéristique du plateau iranien.

Ma thèse se fonde sur les deux hypothèses suivantes : on aurait eu un métissage entre les populations Andronovo et celles du plateau iranien en Asie centrale et ce métissage et les migrations auraient donné les populations de langue indo-iranienne présentes aujourd'hui. Pour vérifier cette hypothèse, j'ai réuni un certain nombre d'individus anciens de la littérature qui étaient déjà publiés. Je me suis beaucoup concentrée sur des individus des steppes au nord de l'Asie centrale. J'ai assez peu d'individus iraniens bien que j'aie récupéré tout ce qui était possible, d'individus Tadjik⁷¹ qui seraient directement sur le territoire où on retrouve aujourd'hui des populations de langue indo-iranienne et de populations en Asie centrale, dans cette région-là. Dans la carte que vous voyez ici, les symboles ronds correspondent à des populations néolithiques et les losanges à des populations plutôt historiques. On n'a rien à

⁶⁹ ensemble de cultures étendues sur un très large territoire en Sibérie méridionale constituant un horizon archéologique de l'âge du bronze entre -1800 et -1200 ans

⁷⁰ religion de la Perse antique du dieu Ahura Mazda.

⁷¹ peuple iranien d'Asie centrale qui parle le *tadjik*

l'âge du bronze et l'âge du fer qui sont les deux périodes qui m'intéressent. Mais ça me permet quand même de comparer les populations récentes avec des populations anciennes de l'âge du bronze et de l'âge du fer, au nord et au sud, et d'avoir un panorama de la diversité eurasiatique. Si je fais une ACP sur les individus récents sur lesquels je projette les individus anciens, j'obtiens la position des individus de langue indo-iranienne qui se situent là et un gradient Iran ancien qui va du néolithique à l'âge du fer et un gradient des steppes. J'observe également une position intermédiaire avec les individus iraniens qui sont relativement éloignés. En effet, quand j'effectue deux statistiques sur ces populations, j'obtiens une statistique F3 qui se lit ainsi : plus l'individu est bas et moins il est proche des populations de langue indo-iranienne et plus il est haut, plus il partage une diversité génétique avec les populations de langue indo-iranienne. Or vous observez que les populations qui sont les plus hautes, avec lesquelles je confirme via une autre statistique la plus grande proximité par rapport aux autres, sont des populations comme par exemple ici des Hongrois médiévaux, des Scythes⁷² hongrois, des populations caucasiennes, des populations celtes et des populations des steppes, pas au nord de l'Asie centrale mais au nord du Caucase. Quand je fais une statistique pour essayer de comparer par exemple les populations Srubnaya⁷³ avec les populations Andonovo, j'ai une statistique négative, ce qui veut dire que les populations de langue indo-iranienne sont plus proches des populations Srubnaya que le sont les populations Andronovo. C'est un peu surprenant puisque ce ne sont pas du tout les populations qui sont les plus proches et ce n'est pas les populations à partir desquelles on a un influx culturel visible à l'âge du bronze.

Cette observation m'a amené à penser à l'issue de ma première année de thèse que l'hypothèse de départ, à savoir « il y aurait eu un métissage entre les populations Andronovo et celles du plateau iranien en Asie centrale et ce métissage et les migrations auraient donné les populations de langue indo-iranienne présentes aujourd'hui » était probablement bien plus complexe. Sans pouvoir éliminer l'hypothèse qu'il y aurait eu des métissages des cultures Andronovo et des cultures iraniennes en Asie centrale, peut-être qu'il y a eu de façon postérieure à ces métissages d'autres arrivées, d'autres migrations, et d'autres métissages de populations plus occidentales. Ce qu'il me manque pour pouvoir établir un scénario qui soit validé, ce sont des individus en Asie centrale qui me permettraient d'ancrer une chronologie, des individus à l'âge du bronze, à l'âge du fer, et de regarder les différences ou s'il y a des

⁷² Ensemble de peuples nomades de la fin de l'âge du fer à l'antiquité des steppes européennes

⁷³ La culture de Sroubna ou culture des tombes à charpente est une culture de l'âge du bronze moyen.

continuités et des remplacements de populations. Voilà, je commence maintenant la deuxième partie de ma thèse qui s'annonce bien car Céline Bon a déjà généré un certain nombre de génomes issus des recherches de Julio Bendezu-Sarmiento en Asie centrale, comprenant des génomes de l'âge du bronze et de l'âge du fer du Turkménistan et du Tadjikistan, un génome de l'âge du fer en Iran et quelques génomes du Caucase pour essayer de voir s'il y aurait un lien avec des individus plus occidentaux. Je vais donc étudier ces génomes et leurs liens avec les autres génomes anciens de la littérature dans mon année et demie à venir.

Pour conclure, cette question des migrations me passionne et je la trouve extrêmement importante. C'est la raison pour laquelle je me suis engagée dans cette thèse parce que pour moi c'est l'un des enjeux majeurs de la société actuelle. D'ailleurs le MNHN avait publié un manifeste sur les migrations. C'est vraiment quelque chose qui me motive puisque les enjeux même de ma thèse me permettent de montrer que les migrations et les métissages sont au cœur de l'histoire humaine et en ont toujours fait partie, n'en déplaise à certains.

4. La Société Française d'ichtyologie, quel rôle dans la recherche et la diffusion des savoirs par Philippe Keith⁷⁴, Professeur, président de la SFI

Je travaille également sur les migrations, mais chez les poissons, et le caractère évolutif de ces migrations, plutôt dans les systèmes insulaires tropicaux. Je suis là au nom de la Société Française d'ichtyologie dont je suis le président. Donc on va parler de quelque chose d'un peu plus léger, moins précis que les excellents exposés que l'on vient d'avoir, et surtout du rôle que peut avoir une société savante dans la diffusion de la recherche et des savoirs aujourd'hui, à l'heure d'Instagram, Facebook et que sais-je.

La Société Française d'ichtyologie est l'héritière de la Société Centrale d'Aquiculture et de Pêche (SCAP) fondée en 1889, et dont le premier Président fut Henri de Lacaze-Duthiers⁷⁵. A l'époque, la SCAP s'intéressait surtout à l'aquiculture, la pêche et à ce qui pouvait être développé pour favoriser l'alimentation humaine, et voulait rassembler tous ceux qui s'intéressaient aux poissons sous une forme ou une autre, marins et d'eaux douces. C'était une époque, pour vous resituer, où la Société d'acclimatation avait aussi beaucoup

⁷⁴ UMR BOREA (Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques), MNHN, CNRS 8067, SU, IRD 207, UCN, UA, 57 rue Cuvier, 75231 Paris cedex

⁷⁵ Biologiste marin, titulaire de la chaire d'histoire naturelle des mollusques au Muséum à partir de 1865, il a fondé deux laboratoires consacrés à la biologie marine, celui de Roscoff en 1872 et le laboratoire Arago en 1882 à Banyuls-sur-Mer.

d'importance. Les deux sociétés avaient un poids dans les relations sociétales, la diffusion des sciences et aussi la dispersion des espèces, à une époque où l'on introduisait beaucoup d'espèces pour l'acclimatation. La SCAP était très importante aussi parce qu'elle diffusait un bulletin (jusqu'en 1950), avec plusieurs numéros par an, parfois 10, d'une richesse exceptionnelle tant dans les procès-verbaux des délibérations de ses membres, que par les publications qu'elle produisait. Vous avez ici un exemple du bulletin. On a la collection complète au Muséum, ce qui représente une masse énorme de données anciennes, d'une grande utilité pour tous ceux qui s'intéressent aux introductions d'espèces, à la pêche, la diffusion des espèces à travers les régions ou les pays. Ces bulletins contiennent des données assez exceptionnelles sur les quantités déversées, sur les régions et les villages où cela a été déversé, qui s'en occupait, etc. Après la deuxième guerre mondiale, la SCAP a un peu de mal à redémarrer et périclité petit à petit, à un moment où d'autres structures apparaissent comme le Conseil Supérieur de la Pêche, etc. qui vont occuper une partie du terrain de la diffusion des connaissances en matière de pêche et pisciculture. De telle sorte qu'en 1976, la SCAP décide de se dissoudre et dévolue tout son actif à une nouvelle venue, la Société Française d'ichtyologie (SFI).

La SFI a été créée en janvier 1976⁷⁶ avec six membres fondateurs du Muséum : Marie-Louise Bauchot, Jacques Daget, Jean-Claude Hureau, Théodore Monod, Yves Plessis et Charles Roux. La nouvelle société avait comme objectifs au départ, non seulement de « récupérer » tout de la société d'aquiculture, l'histoire et même l'historique avec les archives comptables, mais surtout de bien représenter la communauté ichtyologique française au moment où le deuxième congrès européen des ichtyologistes allait se tenir pour la première fois en France et se préparait à Paris à l'Unesco. Les objectifs de cette société n'ont pas changé depuis 1976: regrouper les personnes physiques et morales intéressées au développement de l'ichtyologie fondamentale et appliquée, représenter les membres de la société bien sûr, mais surtout promouvoir, coordonner et diffuser la recherche dans le domaine de ses compétences. Ceci, on le va voir, est un élément extrêmement important dans l'histoire de la Société Française d'ichtyologie depuis Théodore Monod jusqu'à maintenant.

La SFI s'est développée assez rapidement. Je vais donner quelques exemples de ses engagements en matière de diffusion et de promotion de la recherche en ichtyologie. Elle a, à

⁷⁶ Voir une présentation de la SFI par Jean-Claude Hureau dans le compte rendu de la deuxième journée scientifique en 2012 consacré au dispositif naturaliste au Muséum (<https://secmuseum.sitego.fr/>) pages 56 et 57.

un moment donné, créé un site web et une revue scientifique internationale (figure 11), Cybium, qui a l'avantage d'être indépendante des éditeurs privés - ce dont on parle beaucoup en ce moment - et qui est indexée au Current Contents⁷⁷. La SFI organise un congrès ichtyologique tous les trois ans à Paris, extrêmement important pour les jeunes chercheurs, publie des ouvrages thématiques et fait un certain nombre d'expertises pour des ministères, des ONG ou des partenaires institutionnels divers et variés.



Fig. 11 Site web de la Société Française d'ichtyologie © SFI

Le site web de la SFI, dont vous avez ici la page d'accueil (figure 11), s'adresse à la communauté ichtyologique dans son ensemble, de la paléontologie à la taxonomie en passant par la pêche et l'aquaculture. On y trouve des informations sur la diffusion de l'information scientifique, les congrès, les colloques, des stages pour les étudiants allant de la L3 jusqu'aux propositions de thèses et de bourses de thèses, et un certain nombre d'actualités bien sûr. Le site contient un annuaire de l'ensemble des chercheurs et des laboratoires européens qui travaillent en ichtyologie. Pour vous donner une idée, la SFI couvre à peu près 55 pays à travers ses membres, ce qui n'est finalement pas si mal. Enfin, vous pouvez soumettre un projet d'article à la revue Cybium. Tous les numéros anciens sont disponibles sous format pdf gratuitement.

⁷⁷ Base de données bibliographique des articles et du contenu des journaux scientifiques

La revue *Cybium* date de 1947 donc bien avant la création de la SFI. En fait au départ, c'était juste un bulletin de l'association des amis du laboratoire des pêches coloniales. Les plus anciens savent qu'avant le laboratoire d'ichtyologie il y avait le laboratoire des pêches coloniales. Ce bulletin était surtout annuel, avant de devenir bisannuel, et puis, petit à petit a proposé 2-3 numéros par an. C'est en 1977 que la SFI a décidé d'en faire une revue scientifique puis a œuvré pour l'indexer au *Zoological Record*⁷⁸, au *Current Contents*, etc. et développer son facteur d'impact qui est à actuellement autour de 0.8, ce qui n'est pas si mal pour une revue indépendante gérée par une association. Depuis 43 ans, *Cybium* publie à peu près dans tous les domaines de l'ichtyologie. Il y a de très grands articles de nos anciens, on va dire, qui sont assez célèbres dans cette revue, et que je vous engage à regarder dans les index qui sont sur le site. Cela représente quand même à peu près 1200 articles depuis 1977 dans tous les domaines de l'ichtyologie. On en publie à peu près 45 à 50 par an, de la taxonomie à la phylogénie, en passant par la paléontologie. Certains d'entre vous ici ont publié de très nombreuses fois dans *Cybium*, par exemple Gaël ou Guillaume.

Le congrès triennal appelé également, *Rencontres de l'ichtyologie en France*, est un élément important dans la vie de l'association et a été initié essentiellement pour promouvoir les travaux des jeunes chercheurs. C'est Jean-Yves Sire⁷⁹, que certains connaissent peut être, qui en est à l'origine. Il est parti à la retraite depuis. Le congrès a lieu tous les trois ans pendant quatre jours à Paris, au FIAP⁸⁰, à côté de Montparnasse. Il a vraiment vocation à ce que les étudiants, les jeunes chercheurs, de Master 2 à doctorants, post-doctorants, présentent leurs travaux devant la communauté scientifique ichtyologique pour rencontrer les chercheurs plus expérimentés, pour montrer ce que chacun fait. Des prix récompensent la meilleure conférence, le meilleur poster, etc. et c'est toujours intéressant de stimuler la recherche en ichtyologie des différents pays et communautés. En 2000 pour les premières RIF, il y avait eu un excellent exposé de Guillaume sur les Acanthomorphes, suivi d'un autre d'Olga Otero⁸¹, notre collègue de Poitiers, aussi sur les apports et les problèmes de l'approche paléontologique dans la phylogénie des Acanthomorphes. A chaque rencontre, on a à peu près 60 conférences : sur des variations de formes de couleurs chez des poissons sud-américains ; sur l'influence des fossiles dans la reconstruction des phylogénies de notre collègue Lionel Cavin (paléontologue, Muséum de Genève) ; sur la disparition de la biodiversité et la surexploitation

⁷⁸ Initialement une publication de la Société zoologique de Londres, le *Zoological record* est un index de la littérature et des taxons en zoologie, uniquement sous forme électronique depuis 2016.

⁷⁹ Institut de Systématique, évolution, biodiversité, ISYEB

⁸⁰ centre de séminaire pour les entreprises et les associations

⁸¹ rédactrice en chef de la revue *Cybium*

des stocks, ‘quels défis au XXI^e siècle ?’ par Philippe Cury (IRD) très connu pour ses prises de positions et son ouvrage qui est sorti l’an passé. Ce congrès a un vrai rôle de promotion et de diffusion de la recherche en ichtyologie, auprès de la communauté, et on l’espère, auprès des jeunes qui prendront notre suite. La société donne aussi l’opportunité à chacun de publier des ouvrages, qui peuvent être des CD comme l’atlas anatomique d’ichtyologie, réalisé et coordonné en 2009 par notre collègue Bruno Chanet⁸², qui a un succès tellement important que chaque année on est obligés d’en retirer au moins 500 exemplaires. Cela donne une idée de la communauté qui s’intéresse à l’anatomie. Et puis un certain nombre d’ouvrages thématiques peuvent être des monographies comme sur les ‘poissons de Kerguelen et Crozet’, ou alors des ouvrages thématiques sur la biodiversité ou sur les gobies, voire de l’éco-régionalisation d’écosystèmes sur le plateau Kerguelen. La SFI permet donc, à travers, on va dire, l’expérience et le travail accumulé durant un certain nombre d’années par des collègues, de pouvoir valoriser ou transmettre les résultats de la recherche en évolution sur différents supports (papier, CD, internet).

Puisque que l’on est une ONG qui a une certaine visibilité et constitue un réseau d’experts, on nous demande assez souvent de faire des expertises. On a récemment participé à l’actualisation et la diffusion de la liste rouge des espèces menacées de poissons d’eau douce de France métropolitaine, qui est sortie au mois de juillet de cette année. On l’avait fait déjà en 2009 pour la précédente édition. Le ministère de l’agriculture et de l’alimentation chargé de la pêche nous sollicite souvent pour établir des listes d’espèces : protégées, à protéger, à ne pas protéger, introduites, pas introduites. Outre le ministère, nous sommes sollicités par l’Agence Française de la Biodiversité, mais aussi des organismes de recherche institutionnels qui peuvent être l’IRD ou l’INRAE, des institutions là où nous avons des membres. Au niveau international, nous avons été impliqués, à la demande de programmes comme le Critical Ecosystem Partnership Fund (dont on parlait tout à l’heure avec Gaël sur les Comores), sur certaines régions pour assurer le lien entre le programme de recherche en ichtyologie et la diffusion des connaissances vers les populations locales. Il est extrêmement intéressant de pouvoir former, travailler, expliquer, au niveau des populations locales sur l’ichtyologie et sur certains programmes. Là c’est sur la région Pacifique (Vanuatu-Salomon). La SFI participe donc à des expertises au niveau international et des partenariats qui ouvrent aussi des perspectives assez intéressantes pour nos étudiants. La SFI oeuvre pour la promotion de la recherche et la diffusion des savoirs. Mais est-ce utile ?

⁸² Institut de Systématique, évolution, biodiversité, ISYEB

A travers la SFI, on peut effectivement se poser la question du rôle des sociétés savantes d'une manière générale, à une époque où finalement les gens se réunissent peu. Parce que l'intérêt de ce type de sociétés est de permettre à leurs membres de se retrouver physiquement, tous les trois mois au niveau du conseil et une fois par an pour l'assemblée générale. Les uns et les autres peuvent discuter, se rencontrer, etc. On a quand même un compte Twitter, je vous rassure. Mais est-ce que c'est cela qui fait vivre la société ? Je ne suis pas sûr. Je pense que l'on a encore un rôle à jouer, surtout dans la promotion physique de la science. Les anciens ont aussi quelque chose à transmettre à travers ces sociétés dans le cadre de la diffusion, à la fois par les publications, mais aussi par les congrès comme on a pu le montrer là. J'espère vous avoir convaincus...

5. *Le libre accès aux publications des chercheurs du Muséum: objectifs 2020* par Michel Guiraud, Professeur, Directeur général délégué aux collections et Directeur des collections naturalistes et Gildas Illien⁸³, Directeur des bibliothèques et de la documentation

Gildas Illien.- Avec Michel, on a joué sur les mots. Le sujet que l'on avait envie d'aborder porte bien sur l'évolution, mais fondamentalement sur l'évolution des modèles de publications scientifiques. Vous comprenez que c'est un petit peu capillotracté mais c'est un sujet sur lequel l'établissement s'est engagé vraiment fortement depuis l'année dernière et cette journée est l'occasion de le relayer. Je vois certains qui sont totalement acquis et informés du sujet, d'autres peut-être moins. En tout cas, c'est un sujet vraiment stratégique pour les collections, et donc on souhaitait faire un petit topo et aussi un point d'avancement sur ce qui a pu être organisé autour de ce qu'on appelle en bon français l'Open Access, c'est-à-dire le libre accès aux publications scientifiques au niveau du Muséum. Il s'agit de vous faire à la fois quelques rappels sur les enjeux et vous donner un minimum d'informations pratiques et d'avancement sur ce qui se passe pour que vous puissiez éventuellement creuser et surtout faire des démarches concrètes à la suite de cet éclairage.

Je pense qu'il n'est pas utile, même si j'ai indiqué les définitions officielles, de définir ce qu'est l'Open Access. C'est peut-être plus intéressant de vous rappeler la problématique à la fois économique et de principes qui se trouve derrière. Vous êtes des chercheurs, donc vous avez toutes et tous l'expérience de la publication. Vous avez été confrontés à différentes

⁸³ G. Illien est devenu Directeur général délégué aux collections le 1^{er} janvier 2021.

situations de publications et différents contrats d'éditeurs. Pour résumer de manière un peu grossière les choses, et un peu brutale mais efficace, concrètement quand on est une institution comme le Muséum et que l'on est confronté à la question du coût de la publication scientifique, aujourd'hui, mais c'est vrai depuis 20 ans, c'est une situation qui n'a fait que s'enkyster. La puissance publique ou l'institution se retrouve à payer plusieurs fois la même chose, ce qui est un problème et atteint des proportions qui ne sont plus acceptables. Les chercheurs sont payés en tant que fonctionnaires par l'état pour produire du savoir, les bibliothèques universitaires, comme celle du Muséum, achètent à un tarif qui est de plus en plus inflationniste des abonnements à des publications dans lesquelles vous publiez ou vos collègues publient, donc on paie une deuxième fois. Aujourd'hui, pour pouvoir publier en Open Access, un modèle consiste à faire payer les publiants, donc les auteurs pour que leurs publications soient visibles gratuitement par le public, c'est ce qu'on appelle l'Open Access doré ou gold. On paie une troisième fois. Et puis finalement, ce que moins de gens voient, c'est qu'en fait l'archivage pérenne de ces revues dans lequel se trouvent vos articles, on le paie une quatrième fois au niveau national dans le cadre d'une licence auprès de grands éditeurs, pour garantir non seulement le droit de l'accès temporaire à la publication mais le droit de l'accès pérenne pour le stockage des fichiers dans des entrepôts nationaux. Donc, on paie finalement quatre fois la même chose et les taux d'inflation qui sont le corollaire de chiffres d'affaires de grands groupes comme Elsevier ne sont plus supportables. Il y a un mouvement européen, national mais aussi institutionnel, qui s'est mis en place qui s'appelle l'Open Access et qui vise à essayer collectivement de revoir ce modèle en agissant chacun à son niveau. C'est de ça dont je vais vous parler.

Quand on parle d'Open Access, c'est-à-dire assurer le libre accès aux publications, il y a trois voies ou trois modèles qui sont aussi trois couleurs. La voie verte - ces voies sont cumulables, ça peut être une combinaison des solutions qu'on va orchestrer au niveau d'un établissement, d'une politique - consiste à déposer directement ses manuscrits, ses publications dans des entrepôts institutionnels publics, depuis lesquels ils seront librement consultables et archivés. Au Muséum et plus globalement en France, c'est l'entrepôt HAL que vous connaissez, sur lequel je reviendrai plus tard, qui a fini par jouer ce rôle fédérateur dans beaucoup d'institutions. Il y en a d'autres mais c'est l'option majoritairement choisie et c'est aussi celle qu'a retenue le Muséum. La deuxième voie que j'évoquais tout à l'heure c'est cette fameuse voie dorée. L'auteur paie pour que le lecteur n'ait pas à payer l'accès. Le mot-clé qui est intéressant et que vous connaissez si vous avez déjà eu à payer ce type de frais, c'est APC,

en anglais « article processing charge », donc les coûts de publications, ce que l'on doit payer en tant qu'auteur pour pouvoir publier dans une revue qui sera totalement ou partiellement en Open Access. Il faut avoir en tête les ordres de grandeurs pour publier dans une revue correcte. Pour la publication d'un article, le coût de l'APC peut être de l'ordre de 2000 à 2500 euros. Pour un chercheur, individuellement c'est un sujet, mais aussi quand on discute avec les directeurs d'unités ou les responsables en lien avec les organismes. C'est une part de plus en plus critique dans le budget des unités qui pose vraiment question. Surtout si on la croise avec le coût de la documentation, qui consiste aussi quelque part à payer la même chose à l'envers. La troisième voie, la voie diamant, c'est une voie qui consiste pour les institutions, à prendre en charge la totalité des frais. L'auteur ne paie pas et le lecteur ne paie pas. On est sur des modèles de publications où l'on a éventuellement des frais de gestion qui sont très limités. C'est possible parce qu'il y a une puissance publique, une communauté qui s'organise pour garantir des publications qui restent avec des comités de lecture, une évaluation, tout ce qui fait qu'une revue est scientifique mais en éliminant du processus tous les acteurs de la chaîne de publication qui nous facturent leur service. L'exemple le plus proche de nous, c'est celui des publications scientifiques, qui est, sachez-le, quelque chose assez exceptionnel dans le paysage scientifique parisien. Il y a beaucoup de presses universitaires qui ont traversé des crises dont elles ne se sont pas relevées. Aujourd'hui, les publications scientifiques du Muséum sont vraiment un modèle qui arrive, par des astuces propres à Laurence Bénichou, à générer de la recette tout en restant éthiquement absolument inattaquable, et à garantir un accès quasiment gratuit à l'ensemble des publications qui sont faites au niveau des publications scientifiques du Muséum. On peut dire qu'au Muséum, on fait déjà de l'Open Access diamant sans forcément le savoir ou le dire depuis longtemps. Ce sont les trois voies connues.

On a souhaité porter cette question au niveau de la gouvernance du Muséum. C'est aussi un sujet qui prend beaucoup de poids au niveau national et européen et c'est un choix de Bruno David d'en faire un sujet. Avec Jean-Denis Vigne, on est parfaitement en accord ainsi qu'avec les directions des départements pour en faire un sujet stratégique. Ça a commencé par des débats en 2017 et une sensibilisation du conseil scientifique de l'époque, qui ont conduit à une motion du conseil scientifique, la même année, pour dire que le Muséum s'engageait concrètement, avec des actions précises et un plan d'actions dans ce qu'on appelait pas encore science ouverte mais plutôt accès ouvert ou Open Access qui, effet de mode aidant, est devenu la science ouverte plus largement aujourd'hui. Vous avez peut-être vu, s'il vous arrive

de consulter l'intranet, que l'on a déjà fait un travail de sensibilisation, d'explication, de pédagogie que je réitère aujourd'hui et que l'on a vraiment souhaité porter comme un axe très fort, je dirais entre collections documentaires et recherche. C'est un terrain commun pour tout chercheur qui doit publier, la question étant comment. On a associé nos énergies pour mener ce combat. Vous trouverez sur l'intranet - dans une rubrique que l'on a souhaité, même si elle a été rédigée par les bibliothécaires, mettre dans une rubrique de la DGD-REVE, parce que c'est vraiment un sujet de recherche sur lequel on est en appui - un certain nombre d'informations pratiques pour vous aider à au moins explorer ou appliquer la voie verte, c'est-à-dire le dépôt dans l'entrepôt HAL.

Très concrètement et en résonance avec ces différents axes et ces différentes couleurs de l'Open Access, voilà ce que l'on a fait en 2019 et depuis 2017. D'abord on a tenu, du point de vue des acquisitions documentaires de la bibliothèque, une politique à la fois de fermeté et de pragmatisme vis-à-vis des grands éditeurs scientifiques. De nombreuses négociations avec des grands éditeurs ont été conduites au niveau national, puisque c'est au niveau national et dans le cadre d'un consortium qui s'appelle COUPERIN⁸⁴ que ces négociations se font. A chaque fois, pour chaque grande négociation, les établissements sont consultés pour voir s'ils sont prêts à adopter la politique nationale qui se dégage. Très rapidement, on a eu une première étape assez complexe avec l'éditeur Springer à l'issue de laquelle COUPERIN a décidé de ne pas signer la licence que proposait Springer parce que le modèle n'était pas jugé suffisamment transformant, c'est une expression un petit peu à la mode, c'est-à-dire qu'ils gardaient une hausse des coûts qui ne semblait pas acceptable sans apporter de garantie sur les dimensions d'Open Access. On doit, en tant que service documentaire, service de collections, trouver toujours des compromis, c'est-à-dire à la fois des politiques qui soient lisibles d'un point de vue stratégique et penser à la réalité des besoins des chercheurs qui pour publier et pour travailler on besoin aussi d'accéder à de la documentation sans forcément se retourner vers Sci-Hub⁸⁵, ce qu'on ne souhaite pas non plus encourager. Pour ce qui est de Springer, nous n'avons pas adopté la licence mais nous avons conservé 20 titres qui nous paraissaient essentiels pour les chercheurs du Muséum au vu des consultations et payer en conséquence. On a réussi à faire cette négociation en achetant par ailleurs à Springer un grand nombre de e-books qui sont téléchargeables par les chercheurs du Muséum.

⁸⁴ COUPERIN est un réseau de négociation et d'expertise des ressources documentaires électroniques.

⁸⁵ Sci-hub est un site web fournissant un accès libre à des publications scientifiques.

La deuxième étape, qui était très attendue et qui a été un petit peu rocambolesque, fut la négociation Elsevier. En réalité, il faut dire les choses, cette négociation s'est quasiment faite au niveau du premier ministre puisque c'était un énorme chiffre d'affaire et un énorme enjeu. Ça se discute mais on est arrivés à un accord que les autorités ont jugé suffisamment transformant pour que l'on puisse le signer. Depuis plusieurs années, le financement de la négociation avec Elsevier ne se fait par chaque établissement mais est liée à un prélèvement sur la dotation. Si on avait dit non, on aurait perdu l'accès à Elsevier et on n'aurait pas récupéré l'argent. On a fait le choix de ne pas s'opposer et de ne pas s'isoler non plus mais c'est effectivement une décision discutable. Néanmoins, dans l'accord avec Elsevier, il y a des pistes intéressantes qui donnent notamment la possibilité d'avoir un mécanisme qui, à partir d'une publication chez Elsevier, doit conduire à un dépôt automatique dans HAL. Ensuite, ce sont des questions d'embargo et de durée de publication. Plus récemment, il y a eu la négociation avec Nature qui a aussi un ensemble de titres très important pour le Muséum, mais là on a été très pragmatiques en considérant que l'on avait assez avancé sur les autres volets de l'Open Access. La décision a été prise très tardivement dans les discussions de budget. J'avais réservé le budget pour ces acquisitions et si je ne l'avais pas utilisé, les chercheurs n'auraient plus accès à la documentation de Nature et l'argent serait parti dans le trou noir du budget global. J'ai donc décidé de maintenir cet achat auprès de Nature, en concertation avec la recherche. Comme vous le voyez, il y a un mélange de fermeté et de pragmatisme et on va rester vigilant sur la suite de ces négociations.

La deuxième démarche que l'on a faite très concrètement est un calcul assez complexe et qui fait intervenir pas mal d'acteurs dans le Muséum et au-delà, notamment auprès des organismes. On voudrait avoir une vision claire et globale de ce que coûte la publication en Open Access au Muséum, c'est-à-dire faire la somme des APC. Ce qui est assez compliqué dans ce calcul, c'est qu'en réalité les factures d'APC sont très dispersées. Côté Muséum, il n'y en a pas tant que ça. Ce sont essentiellement auprès des organismes avec lesquels on est co-affiliés qu'il y a une prise en charge ou éventuellement des projets de recherche. On est en train d'agréger toutes les données pour connaître le coût global des APC. L'objectif, pour un éditeur ou un ensemble d'éditeurs donné, est de croiser les coûts de ce que l'on paie en abonnements avec ce que l'on paie en APC et pouvoir dire : il y a x chercheurs du Muséum qui contribuent à ces articles-là, peut-être que l'on peut négocier des conditions plus intéressantes au niveau des APC.

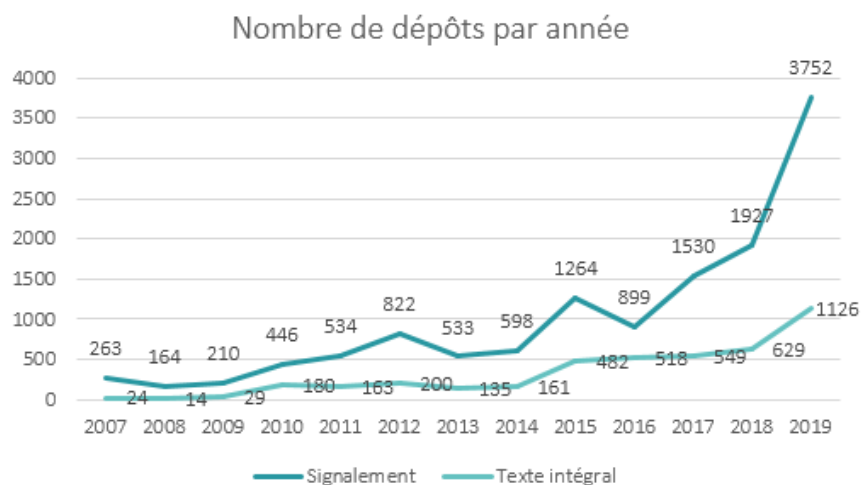


Fig. 12. Dépôts de publications dans HAL au Muséum © Gildas Illien et Michel Guiraud

L'axe sur lequel on a le plus travaillé, c'est celui des dépôts de publication dans HAL (figure 12). Peut-être que certains d'entre-vous y ont déjà participé. Il y a eu cette campagne de com dont je parlais tout à l'heure mais la manière la plus efficace est de former une équipe de bibliothécaires pour accompagner les chercheurs, lorsqu'ils en ont besoin parce que parfois ils maîtrisent très bien le processus. On organise des dépôts-parties. Les chercheurs viennent avec leurs publications (une rétrospective et des choses plus récentes) sur une clé USB et on leur montre concrètement comment faire pour les déposer dans HAL. Souvent, le sujet un peu pointu et compliqué est à la fois de renseigner les métadonnées qui vont bien, que les publications soient rentrées dans le bon référentiel, dans le bon format et avec les bonnes données et les bons identifiants concernant l'auteur. J'y reviendrai. A l'invitation de différentes unités ou de différents départements, il y a eu beaucoup de présentations semblables à celle que je fais aujourd'hui. Cette collaboration autour de la science ouverte et de HAL est un axe de coopération très intéressant et très fort avec l'alliance Sorbonne Université dans le cadre de l>IDEX. Un axe qui a été désigné comme stratégique pour des moyens, de l'ordre de 250 000 euros, qui ont été dégagés. On est par exemple en train de travailler en collaboration avec SU sur la production d'un MOOC science ouverte qui soit adapté aux disciplines, aux personnes et aux cultures professionnelles des établissements de l'alliance Sorbonne Université. Le travail que l'on fait au niveau de la bibliothèque est de s'appuyer avant tout sur les équipes qui sont dans des bibliothèques spécialisées, à proximité des chercheurs, des labos, des collections, avec l'idée de redéployer leur activité, moins

autour de la gestion matérielle des collections, même si elle reste nécessaire, mais plus au service des chercheurs pour les aider à publier. Les bibliothèques spécialisées ne sont pas seulement des lieux de documentation pour alimenter la recherche mais aussi des lieux qui peuvent aider à valoriser ce qui est publié à l'issue de la recherche. Accompagner la recherche du point de vue de la publication, à la fois en amont et en aval. C'est un gros travail de transformation, de compétence, d'activité et on est vraiment engagés sur ce sujet parce qu'il est important. Vous pouvez poser toutes vos questions à l'adresse HAL.mnhn.fr.

Pour finir, je voudrais répondre à une question qui est souvent posée sur HAL Muséum. Quand on dépose dans HAL, ça ne finit pas dans un grand tout, complètement gloubi-boulga invisible. On a créé depuis 6 ans une instance qui s'appelle HAL Muséum dont le référentiel doit être régulièrement nettoyé, parce qu'il y a beaucoup de gens qui saisissent les choses un peu comme ils veulent. Rien que le nom Muséum peut apparaître sous de multiples formes. C'est assez compliqué après d'agréger l'information. Nous faisons le travail de consolidation des données pour que l'information soit aussi bien organisée que possible, mais ce qui est important c'est que l'on ait la possibilité d'avoir un référencement et une visibilité propres au Muséum. Le petit côté cocorico est que l'on a lancé vraiment la campagne il y a à peu près 8 mois et les résultats sont très encourageants puisqu'on a une augmentation de plus de 100% du nombre de documents qui ont été signalés et une augmentation de presque 100% aussi des documents qui ont été déposés en texte intégral. On a fait le point avec Bruno David récemment sur ces chiffres, et puisqu'il est très exigeant il a dit : c'est pas mal mais il n'y a pas assez de fichiers par rapport au nombre de références. Et donc l'idée est d'aller plus loin dans le signalement des métadonnées et la mise à disposition du fichier, y compris si c'est un manuscrit puisque la loi permet maintenant de le déposer.

HAL a mal démarré et n'a pas forcément très bonne réputation en termes d'ergonomie par rapport à d'autres systèmes comme Research gate. L'idée est de prendre peut-être un plus de temps mais de se dire au moins que ce que l'on dépose va rester dans un entrepôt public et ne sera pas privatisé. Ca vaut le coup. Il y a eu de gros progrès en termes d'ergonomie et de fonctionnalités qui font que c'est plus facile et plus rapide de déposer dans HAL aujourd'hui qu'hier. Déposer dans HAL est une sorte de protocole qui va vous amener à faire le point sur vos identifiants. Que ce soit un identifiant Orcid⁸⁶, ISIN⁸⁷, idRef⁸⁸, toute sorte d'identifiant

⁸⁶ ORCID = Open Researcher and Contributor ID (identifiant ouvert pour chercheur et contributeur) est un code qui permet d'identifier les chercheurs et auteurs de publications, imposé par les grands éditeurs.

d'auteur(e)s. Il y a une guerre des identifiants. C'est l'occasion de voir à quel identifiant votre nom est rattaché, pour éviter aussi les synonymes, les homonymes, et vous assurer qu'autour de cet identifiant, vos publications sont bien liées à un entrepôt qui est très interopérable, c'est-à-dire qu'à partir de ces données-là, vous pourrez exporter et gérer votre identité numérique scientifique avec plus de fiabilité depuis un entrepôt public. HAL est aussi très bien moissonné par les moteurs de recherche Google Scholar ou Google tout court. Déposer dans HAL est un gain de visibilité et de référencement de vos publications. Le taux de citations est lié à la visibilité. Et puis il y a d'autres fonctionnalités peut-être plus domestiques mais que je mentionne, notamment la possibilité de mettre à jour votre CV, etc.. Il y a des interfaces qui viennent de l'édition scientifique commerciale, qui sont certainement plus fonctionnelles et qui vous fournissent des services que ne vous apporte pas HAL, mais encore une fois, l'avantage avec HAL est d'agir depuis un espace public. Vous pouvez aussi, et c'est peut-être intéressant, voir les téléchargements qui sont faits de vos publications, avoir des données de reporting à partir de HAL.

Pour conclure, on est en train de sensibiliser et de former les chercheurs à ces actions concrètes en ayant une équipe qui fait un peu colonne vertébrale, c'est-à-dire qui a une vue globale sur le système, l'administre, gère les données, les consolide et reste en support de cette initiative qui est partie pour durer de toute façon plusieurs années en termes d'investissements et de formations. Avec à proximité de vous normalement un bibliothécaire qui peut être là en recours pour vous donner un coup de main autant que de besoin. On a un objectif très ambitieux, que Bruno David nous a fixé qui est que 100% des publications du Muséum doivent être déposées dans HAL à la fin 2020. On est aujourd'hui à quelque chose qui doit être de l'ordre - ça dépend si l'on parle du rétrospectif ou de la production courante - de 30 à 40%, même si on est en train de remonter. On a un an pour atteindre cet objectif et on compte sur vous pour y arriver.

⁸⁷ code ISIN = International Securities Identification Numbers

⁸⁸ idRef = identifiants et référentiels du Système Universitaire de Documentation (SUDOC)

6. *Les collections, une plaque tournante pour l'étude de l'évolution des insectes* par Adeline Soulier-Perkins⁸⁹, Maître de conférences

J'ai l'habitude, lorsque je fais un cours, de parler de la valeur d'un résultat scientifique qui repose sur sa reproductibilité. S'agissant de l'étude de l'évolution à partir des collections, cette valeur va dépendre de l'accessibilité des spécimens car les collections ont un statut de conservation de la preuve, notamment lorsqu'il est question de taxonomie. On va pouvoir, après avoir fait une publication sur un ou des taxons, revenir sur le ou les spécimens pour continuer de construire l'étude de l'évolution, en piochant chaque fois davantage dans les collections pour enrichir les données et aller toujours un petit peu plus loin. Lorsque l'on a un spécimen et que l'on fait sa description, la première étape est donc d'aller piocher dans les collections. Idem lorsque l'on construit des phylogénies, aussi bien à partir de caractères morphologiques que moléculaires. On retourne dans les collections aussi lorsqu'on s'intéresse à la distribution de taxons, aux occurrences de spécimens, que l'on cherche des informations sur les plantes hôtes sur lesquels le spécimen a pu se nourrir, sur les modes de communications ou sur des interactions avec d'autres organismes.

Les collections d'entomologie sont énormes, avec 44 millions de spécimens. La grande majorité est conservée à sec, montée sur une épingle, ou alors collée sur ce qu'on appelle une paillette. La façon de procéder actuellement est de mettre toutes les informations associées sur l'épingle qui porte le spécimen. Cependant, les modes de préparations des spécimens varient au sein de la discipline, ce qui implique des travaux différents, des groupuscules parmi les entomologistes et des pratiques distinctes, comme vous avez pu voir dans la présentation de Vincent tout à l'heure. Chez les lépidoptères, les spécimens sont montés étalés au préalable avec les ailes ouvertes. Une fois qu'ils sont préparés de cette manière, on va les laisser sécher avant de les mettre en collections. Chez les hémiptères, qui constituent le groupe sur lequel je travaille, c'est très rare qu'on les étale de cette manière. Généralement, on les colle sur une paillette. Il n'y a que les gros spécimens que l'on positionne les ailes ouvertes et encore, sur une moitié seulement pour économiser du temps et de l'espace. Ceci donne quand même accès aux caractères morphologiques des ailes, notamment postérieures. Les collections d'entomologie ne comportent pas que des spécimens conservés à sec. Les cochenilles et les pucerons sont souvent montés entre lame et lamelle. Il faut savoir que pour monter une cochenille, le protocole nécessite à peu près une semaine. Les 160 000 préparations de

⁸⁹ A. Soulier-Perkins est membre de l'UMR 7205 Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB, MNHN/CNRS/SU/École pratique des hautes études/Université des Antilles

pucerons et 100 000 de cochenilles représentent donc un travail considérable. Ce sont des collections importantes. On garde aussi une grande partie de ces spécimens soit en alcool soit sous forme d'exsiccata quand on récolte la plante hôte en même temps, ce qui est souvent le cas, et on laisse sécher les spécimens et la plante dans de petits flacons ou dans des enveloppes, constituant ainsi les exsiccata. On va pouvoir revenir sur ce matériel pour faire d'autres préparations, éventuellement dans le cadre d'études sur l'évolution.

Les hémiptères, chers à mon cœur, sont mon matériel d'étude et je commencerai par l'exemple des Lophopidae, à partir des collections d'entomologie (figure 13). J'ai prélevé dans un premier temps un certain nombre de spécimens que j'ai étudiés d'un point de vue morphologique. Cette étude m'a permis de construire une phylogénie pour essayer de rendre compte de l'histoire évolutive de ce groupe. Dans un deuxième temps, je suis retournée dans les collections pour regarder quelle était la répartition actuelle de cette famille d'insectes au sein des régions tropicales et essayer, à partir de ces données, d'en tirer un certain nombre d'hypothèses. Tout d'abord sur l'histoire biogéographique du groupe et comment au cours de l'évolution et de la tectonique des plaques, la famille avait pu se mettre en place à partir d'un épicode quelque part dans le sud-est asiatique, probablement il y a 90 millions d'années. Comment cette famille

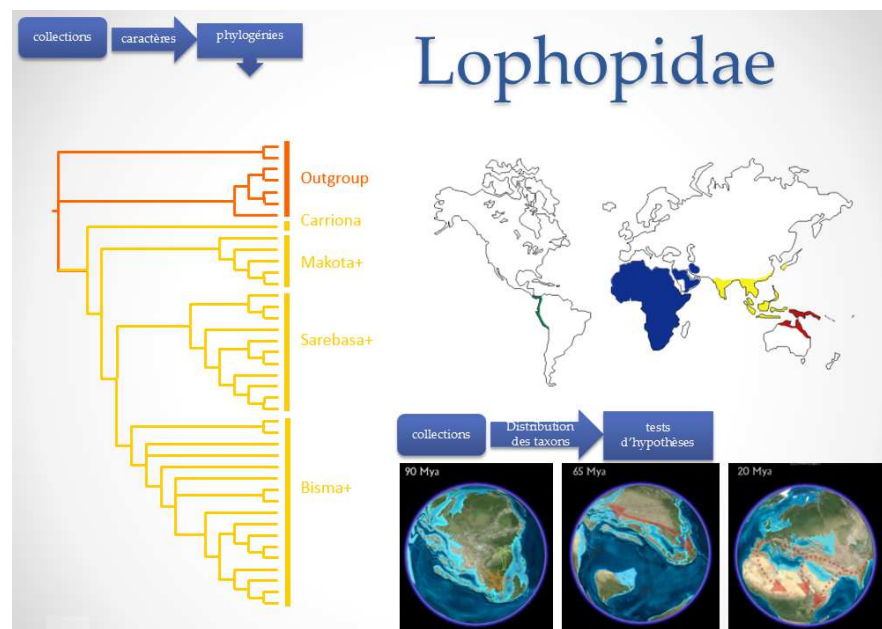


Fig. 13. Construction d'une phylogénie des Lophopidae à partir des collections
© Adeline Soulier-Perkins

s'est déplacée et diversifiée en Asie du Sud-Est, jusqu'en Australie et en Amérique du sud ? Pour certains genres qui se trouvent dans le clade dit *Sarebasa*, deux ont atteint l'Afrique et s'y sont diversifiés. J'ai alors émis l'hypothèse que l'accès à l'Afrique auraient eu lieu il y a environ 20 millions d'années. A partir de là, je suis retournée encore dans les collections pour trouver des informations sur ces insectes phytophages relativement inféodés à un petit nombre de plantes sur lesquelles ils se nourrissent. Je voulais voir comment ils se répartissent sur leurs plantes hôtes. A partir des données collectées j'ai pu mettre en évidence que la majorité de ces insectes se nourrissaient sur des palmiers, sur des Arecaceae ou pour certains sur des Poaceae. J'ai constaté en faisant une optimisation⁹⁰ sur cette phylogénie que l'ancêtre du groupe devait très probablement se nourrir sur des Arecaceae et qu'un petit groupe, ancêtre de *Sarebasa*, devait avoir un régime alimentaire à base de Poaceae. Mis en perspective avec les hypothèses de biogéographies historiques précédentes, cette hypothèse prend d'autant plus de sens que la savanisation de l'Afrique a eu lieu à partir de 20 millions d'années. Ainsi, l'ancêtre des genres *Elasmoscelis* et *Lophops* a pu entrer en Afrique à ce moment-là et profiter de la diversification et de la colonisation du continent par leur plante hôte pour se diversifier. Donc voici un premier exemple d'utilisation d'informations piochées dans les collections pour essayer de rendre compte de l'histoire évolutive d'un groupe et faire un certain nombre de tests d'hypothèses sur des traits particuliers, eux aussi piochés dans les collections.

Le deuxième projet dont je voudrais parler concerne l'impact du réchauffement climatique sur les insectes, en prenant en compte deux scénarios. Un scénario catastrophe où les émissions de gaz ne seraient pas maîtrisés et mèneraient à un réchauffement relativement important et un scénario plus optimiste où l'on arriverait à reprendre le contrôle de nos émissions de gaz et où le réchauffement serait moins catastrophique. Je me suis posé la question en particulier sur des taxons que l'on étudie à Madagascar à partir de leurs occurrences dans les collections d'entomologie. Le problème était d'avoir suffisamment d'occurrences pour pouvoir faire des modélisations de niches⁹¹ écologiques. J'ai cherché un premier taxon, *Amberana* qui est un insecte phytophage très lié aux forêts humides de Madagascar. Lorsque l'on fait cette modélisation de niche on s'aperçoit que les zones humides où l'on trouve ces phytophages sont essentiellement dans les forêts qui longent la côte est. A l'horizon 2080, dans le scénario le plus optimiste, il resterait des petites poches où

⁹⁰ Dans ce contexte, l'optimisation consiste à associer aux taxons terminaux d'une phylogénie existante le process à tester (ici la famille de plante sur laquelle l'insecte se nourrit) puis conserver le scénario évolutif le plus parcimonieux rendant compte de l'évolution de ce process sur la phylogénie.

⁹¹ La modélisation de niche consiste à modéliser l'espace où les variables environnementales sont favorables à la persistance de l'espèce considérée. A partir de là, on prédit la répartition future de cette espèce.

l'on devrait encore retrouver ces insectes-là. En revanche, dans un scénario catastrophe, cette espèce serait vouée à l'extinction. Donc l'évolution du devenir de ces insectes semble relativement compromis dans l'état actuel des choses. Il en est tout autrement avec *Paracopium fenestrellatum*, une punaise très inféodée à une plante de Madagascar, le *Clerodendron*. C'est un insecte phytophage strict qui se trouve dans des zones plus arides de Madagascar. Si l'on fait une modélisation de niche, on voit qu'à l'horizon 2080, dans le pire des scénarios, l'extension de l'aire de distribution recouvrirait presque tout Madagascar. Cependant, le milieu deviendrait beaucoup plus favorable à cet insecte, son développement et sa colonisation étant corrélés aux capacités du *Clerodendron* à se développer sur Madagascar. Donc si l'on inclut cette plante dans les paramètres pour construire l'enveloppe bioclimatique, on voit que ça tempère un petit peu les choses à l'horizon 2080, avec une aire de répartition de *P. fenestrelatum* quand même étendue.

Parmi les autres études réalisées sur les collections d'entomologie, j'en citerai trois. Celle de Tristan Berr et Colin Fontaine⁹² qui ont récupéré des valeurs de distributions et de collectes des spécimens du diptère *Myathropa florea* depuis 1850. Ils se sont aperçus que la phénologie⁹³ de cette espèce s'est modifiée au cours du temps et s'est déplacée dans les latitudes les plus au sud de l'Europe. Aujourd'hui avec le réchauffement, son activité démarre plus tôt dans l'année, ce qu'a été confirmé par des prédictions à partir des données Spipoll⁹⁴ pour l'année la plus chaude ou la plus froide. Si on remonte dans le temps jusqu'en 1850, on s'aperçoit que les données des collections permettent de visualiser ce changement de phénologie avec le réchauffement climatique. Une autre étude, encore en devenir, est un projet de Christophe Daugeron⁹⁵ qui travaille aussi sur les diptères pollinisateurs. Il a fait avec Vincent Lefebvre⁹⁶ une étude sur les réseaux de ces pollinisateurs et les plantes qu'ils visitent. Sachant que ces insectes ont été mis en collections avec un certain nombre de grains de pollen accrochés à leurs soies, l'idée de l'étude est de retourner dans les collections, prélever ces grains de pollen, extraire l'ADN pour déterminer à quelles plantes ils appartiennent, construire des réseaux d'interactions de plantes trouvées dans les collections avec ces pollinisateurs et les comparer avec les réseaux actuels. Le but est de déterminer s'il y a eu une évolution dans la façon des pollinisateurs de visiter et d'interagir avec les plantes. Le dernier

⁹² T. Berr, stagiaire M1 et C. Fontaine, chargé de recherches au CNRS, UMR 7204 Centre d'écologie et des sciences de l'environnement CESCO, CNRS/MNHN/SU

⁹³ Etude des phénomènes saisonniers sur la faune ou la flore

⁹⁴ Suivi photographique des insectes pollinisateurs (Spipoll) est un dispositif de sciences participatives.

⁹⁵ Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB

⁹⁶ Postdoc, département Adaptations du vivant, MNHN

exemple d'études réalisées sur les collections repose des spécimens d'hémiptères qui ont été collectés d'une manière très particulière avant d'être rentrés dans les collections et étudiés.

Les hémiptères ont été échantillonnés dans le cadre d'un projet mené en Papouasie Nouvelle Guinée le long d'un gradient altitudinal de 200 m d'altitude jusqu'à 3700 m, avec un protocole de récoltes très stricte par des pièges Malaise. Quatre pièges avaient été posés tous les 500 m, sachant que ces zones correspondaient à des températures moyennes annuelles et des végétations en strates très différentes le long de ce gradient. A partir de l'étude des hémiptères collectés dans les pièges Malaise, on a pu mettre en évidence : une corrélation pour certains clades entre la richesse spécifique et l'altitude ; la répartition de ces clades ; l'organisation des populations aux différentes altitudes, en particulier pour deux infra-ordres, les Cicadomorpha et les Fulgoromorpha. Ce n'est pas que les cicadomorphes augmentent en diversité en montant en altitude mais ils diminuent moins rapidement que les fulgoromorphes et finalement occupent plus l'espace. A partir de ces premières constatations et de la structuration de ces communautés le long du gradient altitudinal, on a voulu replacer ces résultats dans un contexte phylogénétique. On a sélectionné trois familles de fulgoromorphes dont on a fait des phylogénies pour les espèces que l'on trouvait sur le gradient. Puis on a vérifié si elles se distribuaient le long du gradient en fonction de contraintes phylogénétiques ou non. Est-ce que les espèces les plus apparentées se retrouvaient dans des altitudes similaires ou est-ce que ça n'avait aucune importance ? Allait-on les retrouver distribuées de façon aléatoire tout le long de ce gradient ?

En fait les résultats nous ont permis de constater que parmi les fulgoromorphes, les deux groupes que nous avons, d'un côté la famille des Cixiides et de l'autre la famille des Achilides et celle des Derbides, ne réagissaient pas du tout de la même manière. On s'est aperçus que les Cixiides se regroupaient de façon phylogénétique le long du gradient altitudinal, suggérant une adaptation locale qui façonnait la structure de ces communautés alors que l'évolution du groupe des Derbides et des Achilides et sa distribution ne semblaient pas du tout contraints par l'altitude. L'étape suivante sera de piocher de nouveau dans les collections d'entomologie en s'attachant à certains caractères morphologiques de façon à voir s'il y a des patrons de traits morphologiques qui pourraient être mis en lien avec les patrons de distribution de ces insectes. La prochaine étape de ce projet sera de comprendre si par exemple les très grandes ailes de ce Derbide, qui peut donc se déplacer sans aucun problème le long du gradient, pourraient être un caractère morphologique qui pourrait expliquer que le

Derbide n'ait pas été contraint et que les proches parents ne se retrouvent pas dans les mêmes lieux mais tout le long du gradient altitudinal. Ou alors, est-ce que ce Cixiide ici, qui est très contraint par ses plantes hôtes, est lié directement aux strates végétales que l'on trouve à une altitude donnée et ne peut pas coloniser des altitudes très différentes ?

Pour terminer, une dernière petite photo qui montre que finalement pour les insectes, du cabinet de curiosité de jadis jusqu'aux collections actuelles, il y a aussi une certaine évolution. L'enrichissement par l'étude de ces collections, avec les données associées, est une véritable mine pour étudier l'évolution des insectes.

7. Collections et évolution par Damien Germain, Maître de conférences

Quand on m'a demandé de faire cette présentation, je me suis senti un peu pris au dépourvu parce que jusqu'à présent, lorsque j'étudiais des spécimens de collections, je publiais et je les remettais en place mais je n'avais jamais vraiment réfléchi à la problématique des collections et à leur utilité dans l'étude de l'évolution. C'est une réflexion qui n'est peut-être pas mûre mais qui se fonde sur la définition des collections au Muséum.

« Une collection au Muséum est un ensemble ordonné de spécimens, d'objets ou de documents matériels ou numériques dont le Muséum a la garde en vue de leur conservation, leur étude, leur utilisation comme support de recherche, et de leur communication et diffusion à tous les publics. »

Les collections sont un ensemble très varié en termes matériel, et immatériel comme la sonothèque. Il y a des collections inertes, mortes ou minérales et des collections vivantes qui ne sont pas toutes gérées par la direction des collections. La question que je me suis posée est : a-t-on besoin de collections pour étudier l'évolution ? La réponse sera un peu une réponse de Normands. Ça dépend. Certaines études ne nécessitent pas forcément de mise en collection. Par exemple, l'évolution *in vitro* par cultures de bactéries soumises à différentes pressions, quoique les souches bactériennes peuvent être mises en collections, ou alors les observations directement sur le terrain comme l'évolution des aires de répartitions, des études en éthologie. Passons maintenant dans un monde bizarre, parallèle, où moi, paléontologue, je ferais des études. Je pourrais aller chercher un spécimen sur le terrain, le préparer, l'étudier, le publier et le mettre dans un tiroir, ou dans mon garage ou en décoration chez moi. Le problème est que si tout le monde faisait comme moi, est-ce que j'aurai pu faire des comparaisons de mon spécimen avec les autres ? Heureusement, on ne vit pas dans ce monde-

là. Comme l'a dit Adeline, dans notre monde réel, on emploie la méthode scientifique, la reproductibilité et l'accès aux données, l'accès aux spécimens. Dans ce cas-là, les collections, pas seulement en paléontologie, sont indispensables pour étudier de manière scientifique l'évolution à différentes échelles.

Les collections permettent le dépôt permanent de types⁹⁷ dans les institutions, le retour aux spécimens. Il m'est arrivé plusieurs fois de regarder des publications anciennes très bien faites puis en voyant le spécimen dans les collections, de me rendre compte que ce qui était illustré ne correspondait pas forcément à ce qui existait. Les collections permettent de nouvelles études, en particulier avec des techniques modernes. Il y a également l'enrichissement des collections. Pour l'époque actuelle, on peut suivre l'évolution dans le temps. On a déjà des spécimens dans le registre passé récent. On peut voir, par exemple en faisant des prélèvements d'ADN, l'évolution des structures génétiques des populations dans le temps humain. On peut acquérir aussi des nouvelles données génétiques, anatomiques qui permettent d'affiner notre compréhension de l'évolution des espèces. Je voudrais parler aussi de l'évolution des collections. Il y a beaucoup d'aspects. Celui qui est le plus évident ou à la mode, c'est la numérisation de différentes façons. Ça peut être de la documentation par des scans mais aussi des scanners surfaciques⁹⁸, des CT-scan⁹⁹, l'accès à distance à ces données qui offre une facilité d'approche des spécimens et éventuellement un moindre coût en temps. Pas besoin de se déplacer dans un autre établissement de l'autre côté de la planète. L'évolution, c'est aussi la restitution des collections que l'on a acquises aux dépens de pays qui seraient demandeurs - quelque chose à laquelle on réfléchit - et l'amélioration des conditions de conservation pour garantir l'accès pérenne à ces données.

Venons-en maintenant à la valorisation. Dans l'extrait du règlement des collections que j'ai montré au début, vous avez vu que le mot valorisation n'apparaissait pas. Il apparaît une fois dans le reste du texte, ce qui me gêne un peu car ça correspond à une grande partie des études que l'on fait sur ce matériel qu'on a en collections et qu'on aime valoriser. Je vais donner un exemple d'étude que j'ai faite et vous parler d'un caillou qui vient des grès de Harding, une formation rocheuse datant de l'Ordovicien, il y a à peu près 470 millions d'années (figure 14). C'est un spécimen qui vient du Colorado. Un gros bloc, à peu près rose

⁹⁷ Spécimen à partir duquel a été décrite une espèce.

⁹⁸ appareil de numérisation et d'acquisition 3D

⁹⁹ Le CT (computed tomography) est un appareil à rayons X qui permet d'obtenir des imageries numériques en tranches des différentes parties d'un spécimen.

et plein d'éclats blancs qui sont des fragments de très vieux vertébrés. Des poissons cuirassés recouverts d'une carapace d'os dermique. Une partie des échantillons de grès avait été ramenée - j'ai retrouvé le scan du catalogue des collections qui y fait référence - par Marcellin Boule¹⁰⁰ et Albert Gaudry¹⁰¹ en 1891 dans le cadre d'un congrès de géologie international aux Etats-Unis. C'est le paléontologue américain Charles Doolittle Walcott, connu pour avoir découvert les gisements des schistes de Burgess, qui leur avait fait découvrir le site des grès de Harding et permis de ramener dans leurs bagages ces échantillons de roches. J'étais très content d'avoir touché les mêmes spécimens que nos deux glorieux prédécesseurs. Ces spécimens avaient déjà été étudiés par Léon Vaillant¹⁰² en 1905. Qu'est-ce que j'ai fait de ces échantillons ? Je les ai coupés. J'ai fait des lames minces à l'intérieur. Léon Vaillant l'avait déjà fait en 1905. Certaines lames existent encore. Assez jolies mais historiques, je n'avais pas voulu les déplacer. Par ailleurs, comme ce sont des roches avec des fragments, elles ne peuvent être étudiées qu'en lames minces. Mon but initial était plutôt de faire un catalogue de lames minces d'os de vieux poissons pour décrire, principalement au départ pour de l'enseignement, les premières étapes de l'évolution de l'os.

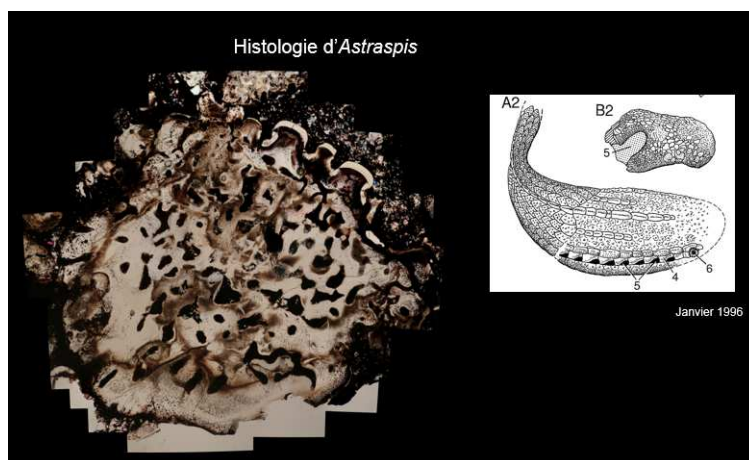


Fig. 14. Lame mince d'un fragment contenu dans le grès de Harding
© Damien Germain

Astraspis est un des taxons présents à l'état de fragments dans les grès de Harding. Il n'existe dans le monde qu'un ou deux spécimens articulés, dont un n'est qu'une empreinte.

¹⁰⁰100 Occupe la chaire de paléontologie du Muséum de 1902 à 1936.

¹⁰¹ Voir le livre de Pascal Tassy cité dans le préambule.

¹⁰² Occupe la chaire des reptiles et des poissons en 1875, devient directeur de la ménagerie du Jardin des plantes en 1900, assesseur du directeur du Muséum de 1903 à 1909, avant de se retirer en 1910 (Jaussaud et Brygoo, 2004, Du jardin au Muséum en 516 biographies, Publications scientifiques du Muséum, 632 pages)

On reconnaît *Astraspis* à ces sortes de tubercules, des odontodes¹⁰³ assez caractéristiques. C'est une structure assez classique d'*Astraspis*. On reconnaît dessous un os assez spongieux, sans ostéocytes¹⁰⁴, et à la base en revanche, - même si ces taxons ont été étudiés depuis plus d'un siècle, de manière intensive, on connaît les lames minces d'*Astraspis* depuis bien longtemps - des structures très bizarres pleines de petites lacunes ovoïdes et alignées, à la base de l'os. D'une part on avait jamais décrit d'espaces cellulaires chez ces animaux-là et d'autre part ça ressemble beaucoup à ce qu'on peut trouver dans du cartilage de croissance, pour faire simple. Du cartilage de prolifération qu'on observe aux extrémités de nos os longs quand on grandit. Ce sont des cellules de cartilage qui se séparent par mitose et qui s'alignent en produisant du cartilage autour d'elles, ce qui rajoute de la matière et fait grandir les os en longueur. Chez nous, c'est détruit et remplacé par de l'os. Ça ressemble beaucoup à un autre phénomène où le cartilage se transforme directement en os comme ici chez le chien ou la souris où on a ces alignements de cellules censées faire du cartilage. On observe donc quelque chose qui ressemble beaucoup à du cartilage qui s'est ossifié ensuite chez les premiers vertébrés.

On a d'autres sortes de cartilage dans ces gisements, notamment du cartilage calcifié globulaire, une autre façon de faire une matière minéralisée qui n'est pas de l'os. On a trouvé ce cartilage calcifié globulaire attaché à des plaques d'*Astraspis* et associés à des lacunes. Donc on se dit qu'il y a quelque chose de plus qu'on ne savait pas avant dans ces vieux vertébrés. Ceci avait fait partie d'un stage du master SEP, qui a été publié dans le Journal of Anatomy cette année. Ici, c'est juste pour résumer les résultats principaux de la structure. En gros, cette partie-là correspondant au dermosquelette était connue, pas celle en-dessous, l'endosquelette qui était inconnu jusqu'à il y a deux ans. Qu'est-ce que ça veut dire ? Normalement, il n'y a pas de cartilage dans le dermosquelette, le squelette qui est à la surface du corps. Nos os crâniens extérieurs sont du dermosquelette mais les os à l'intérieur sont du squelette interne comme les os longs de nos membres. Par conséquent, si on des cellules ressemblent à du cartilage à la base des os d'*Astraspis*, c'est que l'on aurait peut-être un début d'endosquelette chez les tout premiers vertébrés. Dans l'évolution des vertébrés, ce serait un grand changement car normalement le cartilage de prolifération est connu d'abord chez les Ostéichthyens (Actinoptérygiens, Sarcoptérygiens et Tétrapodes), mais là, *Astraspis* est parmi les premières différenciations des vertébrés. Une hypothèse parmi d'autres serait de faire

¹⁰³ Structures dermiques homologues aux dents

¹⁰⁴ Cellule produisant de l'os arrivée à maturité

remonter l'origine de ce cartilage très anciennement. Le problème est que le cartilage ne s'est pas minéralisé, ou très rarement. Il faudrait vérifier chez d'autres spécimens. Mais l'endosquelette en lui-même apparaît un peu avant, comme chez les Galéaspides ou les Ostéostracés, des animaux sans mâchoire et à casque (gros squelette dermique céphalique). Mais là on a un endosquelette chez *Astraspis*. De deux choses l'une, soit il s'agit d'une double apparition de cet endosquelette soit un endosquelette non minéralisé chez les os donc. J'essaie de trouver ce genre de structure chez des taxons où il n'a jamais été décrit. J'ai regardé chez un Hétérostracé. Pour le moment, c'est un échec, je n'ai pas trouvé mais je vais continuer à chercher. Ce que je veux dire par là, et ce sera le message final, c'est finalement qu'observation et valorisation ne s'opposent pas. Ça peut paraître évident à beaucoup mais il y a certaines discussions qui me font dire que tout le monde ne pense pas comme ça. Pourquoi ? Parce qu'on ne peut pas valoriser les collections si elles ne sont pas conservées, et même bien conservées, et que conserver sans valoriser, et là je vais être un peu abrupte, c'est inutile. Avoir des spécimens dans les tiroirs et ne rien en faire, autant ne pas les conserver. Mon boulot est de couper des os. Si on ne me laisse pas le faire, je ne vais pas aller bien loin. Ce que je veux dire est que, en étant raisonnable, il faut nous permettre de toucher aux spécimens, car ça peut apporter de nouvelles découvertes.

8. *L'Herbier national et l'étude de l'évolution des espèces par Myriam Gaudoul¹⁰⁵, Maître de conférences*

Je fais cet exposé au titre de ma responsabilité scientifique de collections, avec l'objectif de montrer comment les herbiers en général, et l'Herbier national conservé au Muséum en particulier, peuvent contribuer à l'étude de l'évolution des espèces. Je commencerai par quelques chiffres. Aujourd'hui, on recense plus de 3 000 Herbiers institutionnels dans le monde, soit plus de 390 millions de spécimens. L'Herbier national est l'un des cinq plus grands au monde avec, si l'on tient compte seulement des plantes séchées (sans compter tous les échantillons en collections complémentaires), environ six millions de spécimens de plantes vasculaires et deux millions de cryptogames. Mis en place à partir du XVII^e siècle, il a été l'objet d'une rénovation de grande ampleur entre 2008 et 2012, qui a notamment permis la numérisation de tous les spécimens de plantes vasculaires. Je le souligne, parce que d'un point de vue de l'utilisation des collections, c'est un pas important. L'Herbier national est au service

¹⁰⁵ M. Gaudoul est membre de l'UMR 7205 Institut de systématique, évolution et biodiversité ISYEB, MNHN/CNRS/SU/École pratique des hautes études/Université des Antilles

de la communauté internationale. Nous sommes une équipe d'environ 15 responsables scientifiques de collections, 13 gestionnaires de collections et des bénévoles, et nous assurons chaque année l'accueil d'environ 240 chercheurs, l'envoi de 3500 spécimens en prêt et également, pour ce qui est des plantes vasculaires (je n'ai pas les chiffres pour les cryptogames), l'envoi de 1200 prélèvements pour des analyses génétiques ou de morpho-anatomie.

Avant d'en venir aux applications un peu novatrices, je voudrais rappeler l'utilisation plus classique des herbiers dans le domaine de la détermination des spécimens, et surtout de la description de la biodiversité c'est-à-dire de la taxonomie puisque même chez les plantes vasculaires, on estime que 10% à 40% des espèces restent encore à décrire. Deux études assez récentes, de Daniel P. Bebber¹⁰⁶ et de Benoit Fontaine¹⁰⁷, ici au Muséum pour le deuxième, ont montré que les herbiers étaient de véritables réservoirs d'espèces nouvelles puisque si l'on considère le temps entre la première récolte et la description d'une espèce, il se passe un temps considérable. La médiane est de 30 ans. Donc, rien qu'en travaillant dans les herbiers, on peut déjà faire avancer considérablement la taxonomie. De ce point de vue, l'Herbier national a un rôle important à jouer, avec notamment plus de 300 000 holotypes¹⁰⁸ conservés dans des pochettes rouges ; ce à quoi s'ajoutent les collections documentaires du Muséum. Le Service des Publications Scientifiques édite aussi une revue de botanique, *Adansonia*, et trois *Flores* : du Cambodge, Laos et Vietnam, de la Nouvelle-Calédonie, et de Madagascar. Par ailleurs, depuis une ou deux décennies, de nombreux progrès ont été faits en informatique, en imagerie, en génomique... ce qui a ouvert tout un panel de nouvelles perspectives pour les herbiers et leur utilisation en vue d'études sur : 1) la répartition des espèces ; 2) la diversité et l'évolution des traits ; 3) les analyses génétiques. On va voir que selon le type d'utilisation, on peut travailler soit seulement sur les étiquettes, soit sur les plantes séchées en elles-mêmes.

Les données mentionnées sur les étiquettes de récolte sont en effet très utiles. Elles renseignent notamment sur la répartition des espèces. Par exemple, je citerai un projet qui concerne les espèces rares et la conservation de la flore de Nouvelle-Calédonie. Cette étude réalisée sur des spécimens de l'Herbier national a permis d'identifier plus de 600 espèces endémiques étroites - présentes dans moins de trois localités - à partir des données présentes

¹⁰⁶ Bebber et al., 2010. Herbaria are a major frontier for species discovery. *PNAS* 107 : 22169-22171.

¹⁰⁷ Fontaine et al. 2012. 21 years of shelflife between discovery and description of new species. *Current Biology* 22 : R943-R944.

¹⁰⁸ Un holotype est le spécimen de référence, utilisé pour décrire une nouvelle espèce.

sur les étiquettes. Grâce à cela, on peut proposer de protéger ces espèces et/ou des zones géographiques de manière prioritaire. Ensuite, si l'on croise les données ainsi obtenues avec la modélisation des niches écologiques, comme l'a montré Adeline Soulier-Perkins tout à l'heure, on peut alors tester des corrélations entre certains paramètres environnementaux et l'abondance en espèces rares, et éventuellement émettre des hypothèses pour expliquer cette rareté. Une autre étude concerne un projet qui vient de démarrer, intitulé FenTOM pour "Flore endémique terrestre des Territoires d'Outre-Mer". Ce projet, coordonné par Serge Muller¹⁰⁹ et financé par l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB), vise à utiliser les données d'herbiers pour mieux caractériser la flore endémique terrestre des territoires d'outre-mer. Toujours à propos de la répartition des espèces, mais un peu à l'opposé des espèces rares, les données sur les étiquettes renseignent sur les espèces envahissantes. Et là aussi, les herbiers ont un intérêt capital, notamment par la dimension temporelle qu'ils recouvrent, puisqu'ils vont permettre de retracer l'expansion de ces espèces envahissantes, leurs voies de colonisation, etc. Bruno Chauvel¹¹⁰ a utilisé, entre autres, l'Herbier national pour retracer l'expansion de l'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) en France depuis la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'à la fin du XX^{ème}.

Les herbiers offrent donc beaucoup de possibilités d'étudier les aires de répartition. Néanmoins, il ne faut pas oublier que les données qui en sont issues présentent certains biais, notamment parce que les récoltes ne sont pas faites de manière aléatoire. On peut avoir des sur- ou sous-représentations de certaines zones géographiques (le long des routes par exemple, ce qui arrive souvent), de périodes, de groupes taxonomiques (plus ou moins charismatiques et plus ou moins souvent récoltés). Ensuite, il faut avoir à l'esprit que les données d'herbiers indiquent seulement la présence. Or ce n'est pas parce qu'il n'y a pas de spécimen pour une espèce donnée à un moment donné en un lieu donné, que cette espèce n'était pas présente sur ce site au moment de la récolte. Une autre difficulté que l'on peut rencontrer dans les données d'herbiers concerne les localités géographiques indiquées sur les étiquettes, qui sont parfois très peu précises. Tous ces biais et difficultés sont spécifiques aux collections et il faut en tenir compte dans les analyses et dans l'interprétation des résultats.

L'utilisation des informations sur les étiquettes a beaucoup bénéficié de la numérisation des planches d'herbiers et de la mise en ligne des millions de spécimens scannés, pas

¹⁰⁹ Professeur du Muséum et responsable scientifique de l'Herbier national, UMR 7205 Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité (ISYEB)

¹¹⁰ Bruno Chauvel est directeur de recherches INRAE à Dijon

seulement de l'Herbier national. Même si le Muséum était pionnier il y a une dizaine d'années, il y a en effet eu beaucoup d'autres projets depuis. De nombreuses images sont disponibles en ligne, ce qui représente beaucoup de données potentielles. Ceci dit, si les spécimens sont numérisés, ça ne veut pas dire qu'ils sont complètement informatisés. Ici au Muséum, seulement 15% à 20% des spécimens le sont totalement, c'est-à-dire avec l'ensemble des données de récoltes. Depuis 2013, pour essayer d'accélérer ce rythme d'informatisation des collections et d'accès aux données, un site de science participative a été mis en place, Les Herbonautes, organisé autour de missions thématiques. Chaque mission se focalise sur un genre, un récolteur, un pays... Cela permet aux participants, au grand public, de visualiser des photos d'herbiers et d'implémenter la base de données (moyennant bien sûr toute une procédure de validation avant que les données ne rentrent véritablement dans la base).

Passons maintenant au deuxième grand type d'applications des herbiers, comme des collections d'histoire naturelle en général : l'étude de la diversité et de l'évolution des traits. Je vais en évoquer trois types différents : les traits morpho-anatomiques, les traits d'histoire de vie, et les processus physiologiques. Le grand intérêt des herbiers va être de permettre un échantillonnage très large, d'abord d'un point de vue géographique. Grâce aux herbiers, on a souvent accès à des régions géographiques difficiles d'accès, ou instables d'un point de vue politique et où l'on ne peut pas aller échantillonner. Ainsi, les herbiers élargissent l'échantillonnage géographique. Ils ouvrent aussi les possibilités en termes de taxonomie, en donnant accès à des espèces très rares voire éteintes. Enfin, comme pour les aires de répartition, on a toujours cette dimension temporelle c'est-à-dire qu'on va pouvoir étudier l'évolution dans le temps de certains traits. Une étude morpho-anatomique a été faite à des fins de taxonomie par Germinal Rouhan¹¹¹, ici à l'Herbier national. Elle concerne un genre de fougère, *Elaphoglossum*, à Madagascar (figure 15). Germinal a principalement étudié des caractères discriminants entre ces espèces à savoir la diversité des écailles et la diversité des spores. Un deuxième exemple d'étude morpho-anatomique, menée également au Muséum par Florian Jabbour⁶, concerne la morphologie florale chez le genre *Delphinium* (Ranunculaceae). Florian a utilisé des techniques de morphométrie classique, mais également des techniques plus modernes de morphométrie géométrique, comme Vincent Debat l'a évoqué tout à l'heure, qui permettent une analyse plus approfondie des formes. Là encore, le fait que les spécimens

¹¹¹ Germinal Rouhan et Florian Jabbour sont tous deux Maîtres de conférences et responsables scientifiques de collections, UMR 7205 Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité (ISYEB)

soient numérisés amplifie l'intérêt des herbiers parce que l'on va pouvoir faire des mesures sur des spécimens à distance, voire même, en ce qui concerne la morphométrie géométrique, automatiser les mesures et donc accélérer le rythme des études. En ce qui concerne les traits d'histoire de vie, je voulais juste

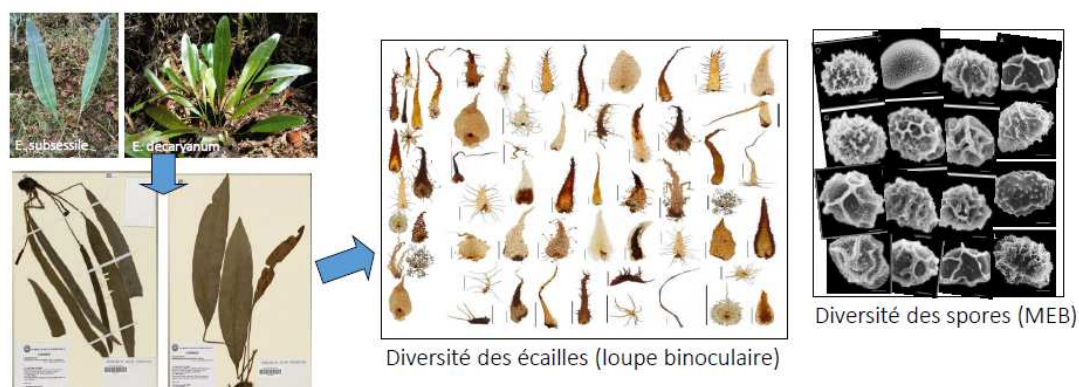


Fig. 15. Traits morpho-anatomiques : identification de caractères diagnostiques de fougères du genre *Elaphoglossum* à partir de spécimens de l'Herbier national (G. Rouhan, non publié)

évoquer rapidement l'exemple le plus classique, à savoir la date de floraison. De nombreuses études ont utilisé les spécimens d'herbiers pour comparer la situation actuelle à celle d'il y a un siècle environ, et ont montré l'impact du réchauffement climatique avec des dates de floraison actuelle plus précoces de plusieurs jours. Enfin, si les études de processus physiologiques sont peut-être les moins abondantes à l'heure actuelle, il y a quand même des exemples vraiment intéressants. Par exemple, des chercheurs ont quantifié, à partir des herbiers de Washington, le contenu protéique dans le pollen d'une espèce d'Asteraceae. Ils ont montré que l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique provoquait une diminution du contenu en protéines dans le pollen, ce qui a probablement un impact sur les populations de pollinisateurs qui s'en nourrissent. Un autre exemple de trait physiologique, ce sont les échanges gazeux foliaires ; ils peuvent aussi être abordés à partir des herbiers comme cette étude sur des arbres tropicaux du bouclier guyanais, où des chercheurs ont utilisé des spécimens de l'Herbier national pour étudier l'effet du changement climatique. Très souvent, on le voit, les herbiers servent donc de témoins de la réponse des végétaux au changement climatique. Enfin, je voulais évoquer un projet en cours à l'Herbier national, qui vise à détecter des espèces hyper-accumulatrices de métaux lourds. On connaît déjà plusieurs centaines de ces espèces, beaucoup en Nouvelle-Calédonie et à Cuba, mais sans doute beaucoup d'autres restent à identifier. Un petit appareil portable permet de mesurer certains

métaux lourds de manière facile, rapide et non destructive. Un projet est en cours au Muséum, coordonné par Sylvain Merlot¹¹² et auquel collabore Vanessa Invernón¹¹³. Il a déjà permis d'identifier une vingtaine d'espèces hyper-accumulatrices qu'on ne suspectait pas auparavant. C'est une utilisation des herbiers à laquelle on ne pense pas forcément, mais qui est intéressante.

Le dernier type d'applications que je vais évoquer, et qui est en plein essor, concerne les analyses génétiques. Il y a une profusion de travaux et d'articles de synthèses sur le sujet depuis une dizaine d'années. Comme pour l'étude des traits, le grand intérêt des herbiers va être d'élargir l'échantillonnage en termes géographiques et taxonomiques, avec encore une fois également la possibilité d'une dimension temporelle. Il y a deux grands types d'études (qu'on retrouve d'ailleurs également en ce qui concerne les traits morpho-anatomiques) : les études portant sur les plantes elles-mêmes, et celles portant sur les organismes associés. Ces organismes associés peuvent être des pathogènes, des parasites ou des symbiotes, et sont l'objet de plus en plus d'études. Grâce aux nouvelles technologies de séquençage, on arrive maintenant à des quantités et des qualités de données très intéressantes, qui permettent de nombreuses applications. Cependant, les prélèvements sont forcément destructifs et il est important de s'interroger sur le compromis entre l'utilisation et la valorisation des collections d'une part, et leur préservation à long-terme d'autre part. Sachant que ces études sont en croissance exponentielle, il y a vraiment une réflexion à avoir. Comment optimiser au mieux ce compromis ? Depuis quelques années, des techniques d'échantillonnage non destructif sont tentées, mais elles restent encore très préliminaires. De plus en plus d'études utilisent les herbiers comme source d'ADN, et peuvent ainsi même intégrer des lignées éteintes dans des études phylogénétiques. De nouveau, les herbiers permettent d'accéder à une dimension temporelle, ce qui a des applications possibles en génétique de la conservation, pour reconstruire des voies d'expansion, étudier la génétique moléculaire de certaines lignées colonisatrices et le rôle adaptatif de certaines mutations, etc.

Concernant les organismes associés que l'on peut échantillonner sur les planches d'herbier, l'exemple le plus ancien et sans doute le plus emblématique est celui de *Phytophthora infestans*, le mildiou de la pomme de terre. C'est le parasite qui a causé la grande famine du milieu du XIX^{ème} siècle en Irlande. Ce parasite a pu être séquencé complètement à

¹¹² Sylvain Merlot est chargé de recherche au CNRS à Gif-sur-Yvette.

¹¹³ Vanessa Invernón est responsable du service de conservation de l'Herbier national

partir de spécimens d'herbiers du milieu du XIX^{ème} siècle. En effectuant des analyses phylogénétiques et des analyses de génomique comparative, on peut remonter à l'émergence de ces épidémies et étudier l'évolution des agents pathogènes ou parasites. Il y a en ce moment un projet ANR (MUSEOBACT) coordonné par Adrien Rieux, du CIRAD de Montpellier et de la Réunion, et auquel on collabore ici à l'Herbier national. La démarche est d'utiliser les collections comme source d'ADN de bactéries et de virus pathogènes des cultures, notamment des agrumes et du manioc. Là encore, l'objectif est de retracer l'émergence des pathogènes et de mieux comprendre les mécanismes de virulence et l'évolution moléculaire. La dernière application que je voulais évoquer ne concerne pas des pathogènes ni des parasites, mais des symbiotes. Une étude publiée en 2019 - je crois que c'est la première qui a utilisé les herbiers en ce sens - a extrait de l'ADN à partir de racines de plantes pour caractériser les communautés mycorhiziennes. C'est aussi le projet de recherche que propose de mener Roland Marmeisse¹¹⁴, qui va intégrer notre UMR en 2020.

Pour conclure, je pense que les herbiers sont plus que jamais un outil de la recherche actuelle en évolution et pour cela il faut : i) continuer à faire des récoltes modernes, c'est-à-dire complètes avec des échantillons en silica-gel pour l'ADN, des données précises sur les localités, des photos de terrain, etc.; ii) tenir compte des spécificités propres aux collections ; iii) continuer à faciliter l'accès aux ressources par la numérisation et la mise en réseau ; iv) ne pas oublier la taxonomie, qui est à la base de tout projet de recherche en évolution.

7. Débat : Quels sont les apports des transversalités Collections/Recherche dans l'étude de l'évolution du vivant au Muséum ?, modération Gaël Clément, Professeur, directeur du département Origines et évolution

Gaël Clément : *Au niveau de l'établissement il faut que l'on travaille sur la montée en puissance de la transversalité. J'ai été heureusement surpris de voir que l'article 2 des statuts de la SECM montrait qu'il y avait un besoin de travailler dans la transversalité et de favoriser le rayonnement de l'établissement. Ce sont également les missions des départements scientifiques. Je suis le directeur du département Origines et évolution mais je représente aussi les deux autres directeur et directrice de département (Frédérique Chlous et Jian-Sheng Sun) qui auraient aimé être là. Les intervenants de cette journée étaient des personnels des*

¹¹⁴ Roland Marmeisse est directeur de recherche au CNRS, UMR 7205 Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité (ISYEB).

trois départements, ce qui est important. L'idée est de faire une montée en puissance de tout ce qui est transversal et en particulier, ce qui me tient à cœur depuis très longtemps et vous en avez parlé ce matin, sur les problématiques de l'évolution et comment le Muséum se positionne, en interne mais aussi à l'extérieur, sur la visibilité des collections, de la recherche, de l'expertise, de l'enseignement et bien sûr de la diffusion. Dès le début de l'année prochaine, on va travailler sur ça au sein de nos conseils de départements, mais absolument pas en nous cloisonnant. On va travailler avec Frédérique Chlous et Jian-Sheng Sun pour identifier les bons interlocuteurs dans les différents départements mais également des DGD et des services de l'établissement pour commencer à mettre en place des relations intermétiers beaucoup plus fortes sur cette problématique de l'évolution au sein de l'établissement.

J'ai été vraiment impressionné par l'ensemble des présentations d'aujourd'hui, même si je connais un petit peu les thématiques de recherches. Il y en a encore qui restent à découvrir. Il est important que l'on travaille sur des données de la recherche qui sont essentiellement issues de la richesse et la diversité de nos collections. Il y a énormément de chercheurs, d'enseignants-chercheurs, de doctorants et d'autres acteurs qui travaillent sur nos collections. Ce qui est intéressant, comme cela a été dit, est que ce grand instrument constitué par les collections peut être un instrument moderne sur l'évolution. Concernant chaque spécimen, il y a toutes les données morphologiques mais également les données cachées au sein du spécimen. Ça peut être de l'histologie. Parfois, il faut couper ou trancher. Ceci doit être discuté dans le cadre de la réglementation concernant les prélèvements qui doit être mise en place. Et puis il y a tout ce qui est holobionte, tout ce qui est « omics » par rapport au spécimen quand il est biologique. Tout ce qui est associé effectivement au spécimen qui est une richesse incroyable. Je pense qu'on en a à peine l'idée et l'utilisation. Ce sera aussi à développer. Et puis on travaille sur des corpus. Là aussi on a la chance d'avoir une très grande richesse des collections, plus de 68 millions de spécimens, avec certaines collections numérisées et accessibles grâce à une mise à disposition à distance. On a ainsi la chance aussi de pouvoir travailler sur de très grands corpus, que ce soit dans un intérêt historique ou géographique comme cela a été dit également.

Sans prendre trop de temps car vous avez peut-être des questions sur les présentations de cet après-midi, je voudrais revenir sur les données de la recherche issues des collections et la valorisation dont dans des publications scientifiques. Mais une fois qu'on a fait ces

publications, l'intérêt c'est de les diffuser. Cette diffusion doit être destinée à l'enseignement au niveau de tous les publics, scolaires et universitaires, ainsi qu'à l'ensemble de la communauté. Ça passe aussi, on en a parlé tout à l'heure, par la mise à disposition du plus grand nombre de nos publications. J'insiste sur la nécessité, comme Gildas l'a très bien montré, de déposer vos publications dans HAL, parce que c'est aussi un atout majeur pour notre mission de diffusion. Avez-vous des questions sur certaines des présentations de l'après-midi ?

Vincent Debat : J'ai deux questions. La première sur l'Open Access doré. Vous disiez que ça coûte à peu près 2500 euros. Ça varie d'un journal à l'autre. Je me demande ce que l'on paie. Quel est le coût d'un article pour l'éditeur ? C'est une question toute simple mais c'est important. J'ai une autre question suite aux exposés de Damien et Myriam sur la construction des collections. Pour moi, en réfléchissant un peu à la valeur des collections pour l'étude de l'évolution, pour moi une collection est un échantillonnage, biaisé comme Myriam l'a dit. Les biais sont très différents d'une collection à l'autre avec par exemple une multitude de collecteurs différents, les époques changent, la géographie, etc. Je voudrais savoir s'il y a une réflexion sur la constitution des collections actuelles, sur la méthodologie. Concernant les collections d'insectes, on fait avec un contingence historique. On récupère des collections, on achète des collections privées, parce qu'elles sont riches, mais on n'a pas de contrôle sur la façon dont les spécimens ont été échantillonnés. Je me demande, naïvement sans avoir d'idée, s'il y a vraiment une réflexion sur la façon de constituer nos collections, la façon de les enrichir, s'il y a une méthode scientifique qui dépend des questions que l'on se pose et de l'usage que l'on veut faire des collections. J'imagine qu'il n'y a pas de réponse globale à cette question. En paléontologie, on peut difficilement planifier l'échantillonnage de la même façon que dans d'autres disciplines.

Gaël Clément : Je vais donner la parole à Gildas mais pour revenir à la question du coût des publications, les coûts sont parfois de 5000 euros, pas forcément 2500 euros qui n'est qu'une moyenne.

Gildas Illien : Tout à fait, c'est la question que tout le monde se pose. Il ne faut pas être trop polémique non plus. Il faut faire attention. Publier dans HAL n'est pas comme publier dans un journal. En tant qu'utilisateur, il y a une différence entre je dirais taper dans un moteur de recherche le titre d'un article et pouvoir l'approcher dans un contexte éditorialisé. Une

revue, c'est différent d'une base de données. Qu'est-ce qui fait cette différence, au-delà de l'évaluation de l'article ? C'est le fait d'avoir défini une politique éditoriale et d'avoir assemblé les referees, qui souvent ne sont pas payés pour le faire. C'est aussi le sens de la question parce l'évaluation par les scientifiques n'est pas rémunérée. Elle peut être rétribuée sous des formes symboliques. Mais il y a quand même déjà toute une organisation - je pense à la présentation de tout à l'heure en ichtyologie - c'est une communauté qui s'organise, qui s'anime pour faire vivre une revue et ceci a un coût. Lorsque l'on dit que le numérique a énormément baissé les coûts de fabrication et de production par rapport à l'impression papier, c'est une vraie réalité. On a clairement une baisse des coûts de production entre une publication en ligne versus une publication papier, sa diffusion, les frais de transport, etc. Néanmoins, le numérique comprend des coûts qui sont d'un autre ordre, par exemple, pour qu'une revue soit bien référencée avec les bons mots-clés qui passent bien quand on va chercher. C'est aussi un paysage compétitif. Les pilotes d'une revue en ligne vont devoir défendre aussi cette revue dans l'univers du web. Ce n'est pas un coût zéro. Il y a des coûts techniques qui sont associés au numérique, ainsi que des coûts de stockage qui sont derrière. Les publications scientifiques du Muséum ne sont pas entièrement gratuites. Il y a réellement un travail, des ressources humaines, de la gestion administrative. Il faut bien que ce travail soit rémunéré. Editeur, c'est un métier. Aujourd'hui, il y a clairement un écart entre les coûts réels et ce que l'on fait payer. Qu'est-ce que l'on paie ? C'est la marque, le titre, la réputation. C'est là-dessus qu'il y a débat et problème. On ne peut pas considérer que ce travail de mise en forme doive être gratuit. Il y a un coût et quelqu'un doit bien le payer. Néanmoins, jusqu'à une certaine hauteur qui soit acceptable. Le fond de mon message, c'est qu'il ne faut pas dévaloriser le métier d'éditeur. Il y a beaucoup d'éditeurs qui continuent de faire leur boulot. Je pense à toute la communauté qu'il y a derrière BioOne par exemple qui fait un travail formidable. Pour l'accès à la totalité de BioOne, on paie 150 euros pour tout le Muséum par an. C'est franchement pas beaucoup. Ces éditeurs sont dans une logique d'Open Access. Ils ne cherchent pas à faire du profit mais ils ont besoin d'exister. Il faut que l'on paie quelque chose en APC (coûts de production) dans ces cas-là. Il y a un vrai problème mais il ne faut pas détruire le métier d'éditeur.

Gaël Clément : Il y a des choses sur lesquelles on n'a pas la main, mais ça n'empêche pas d'avoir une politique au sein de l'établissement même. Effectivement, les APC sont quand même souvent assez onéreux. Au niveau des unités, ça commence à coïncider lorsqu'il y a moins de crédits de base émanant des différentes tutelles. Ca devient parfois assez tendu pour

certaines unités. Il y a des unités qui mettent en place des politiques par rapport à ça. On peut très bien imaginer que pour les doctorants ou les postdoctorants, qui sont dans une recherche de postes et ont besoin d'avoir un CV de haute qualité, on puisse accepter de payer des APC, et, pour ceux qui sont en poste, de favoriser les revues diamant. A terme, c'est comme cela qu'on va y arriver mais il faut que chacun fasse le premier pas vers ça. Michel, tu veux peut-être dire un mot sur la politique scientifique d'enrichissement des collections ?

Michel Guiraud : La politique d'enrichissement des collections est très dépendante des activités de recherche parce que c'est la recherche qui produit des collections. C'est la collecte des chercheurs du Muséum. Les expéditions, typiquement la planète revisitée, peuvent explorer une région avec d'autres collègues qui ne sont pas du Muséum. C'est la recherche qui détermine la politique d'acquisition. C'est le premier pilier. Il y a un deuxième pilier qui a été souligné aussi, composé de toute une communauté d'amateurs, de naturalistes qui ont collecté mais qui arrivent à un âge avancé ou décèdent et qui cèdent leurs collections. Ça a toujours existé. C'est l'acquisition de collections déjà existantes et constituées. Dans le second pilier, c'est de l'opportunité, dans le premier c'est la recherche qui pilote. Le troisième pilier qui devrait être mis en place, et c'est le rôle des responsables scientifiques des collections, c'est de regarder le paysage scientifique, les questions scientifiques qui se posent et se demander si nos collections peuvent répondre à ces questions-là. Outre les deux premiers piliers, à savoir la recherche induisant les collections, c'est la question scientifique du Muséum qui va produire des collectes, et les collections d'opportunités, ce qui manque et qu'il faut mettre en avant, c'est ce troisième pilier. Si nos collections ne peuvent pas répondre à la question, il faut se demander ce qu'il faudrait faire pour les enrichir. Quitte à faire peser l'effort sur des domaines où l'on n'a pas de spécialistes. C'est normal, ce troisième pilier ne sera pas rempli par les missions de collectes qui par définition ont les spécialistes qui s'y intéressent. C'est sur ce troisième pilier qu'il faut travailler en terme de politique.

Gaël Clément : Il y a deux choses que l'on peut essayer de mettre en place au niveau de l'établissement. La première est de faire des missions communes. Si une mission va collecter spécifiquement des arthropodes terrestres par exemple, ou faire des échantillonnages marins, il s'agirait de ne pas ramener uniquement les organismes intéressants pour les spécialistes présents de la mission, mais d'en rapporter d'autres pour transmission à davantage de spécialistes. Rapporter par exemple l'ensemble des sédiments pour que tous ceux qui travaillent sur les micro-organismes puissent aussi en profiter. Ça peut être assez facile à

mettre en place. La deuxième chose à mettre en place concerne un grand projet international qui s'appelle One World Collection¹¹⁵. Bruno David est très impliqué. Il s'agit de faire une évaluation de tout ce qui est présent, et donc conservé, dans la plupart des grands musées d'histoire naturelle du monde. D'identifier quelles sont les collections faunes-flores présentes de telle ou telle région du monde, d'identifier ce qui reste comme zones blanches ou peu étudiées, et de façon commune cibler plutôt celles-ci. Est-ce qu'il vaut vraiment le coup d'organiser une mission pour faire des doublons plutôt qu'organiser une mission commune au niveau international sur des zones d'intérêt plus important ?

Line Le Gall : *Je voulais rebondir sur ta question Vincent. Quand je suis arrivée au Muséum, j'ai été chargée de conservation, je me suis alors demandé quelle biodiversité on gardait entre nos murs au Muséum. Peu à peu j'ai compris que les collections contribuaient au régime de la preuve scientifique. Je pense qu'Adeline l'a très très bien exposé au début de son introduction, on est là-dedans, et on a plutôt à faire à une succession des pratiques, et j'ai envie de dire plus du savoir faire des scientifiques à travers les époques. Il me semble aussi, dans ce contexte-là, que les collections que l'on met en place sont en train de répondre aux questions que nous nous posons en termes de recherche, ce qui est à peu près ce que tu disais Michel. Je pense qu'aujourd'hui, un des gros enjeux, tu l'as dit Gaël, c'est quand même la question d'holobiome, mais on voit bien qu'avec nos collections, on a du mal à faire le lien entre différents organismes. Typiquement, entre les plantes et les insectes, on a beaucoup de mal à faire ces ponts à travers nos collections qui sont en silos à l'heure actuelle. Je pense qu'il va falloir que l'on arrive, à un moment ou à un autre, à dépasser les silos des grands ensembles et qu'on soit capables de faire une interopérabilité au moins au niveau de nos bases de données pour pouvoir peu à peu aborder une question de type holobiome.*

Gildas Illien : *Si je peux contribuer avec mon point de vue un petit peu iconoclaste. Ce sont des questions que l'on se pose exactement sur les collections patrimoniales ou documentaires qui ne sont pas des collections de spécimens. Qu'est-ce qu'une politique globale et sur la durée et quels sont les critères ? Pour rebondir sur ce qui a été dit, je voudrais apporter deux contributions. Premièrement, ce qui est important de bien voir et qui est un vrai défi c'est qu'une politique de développement des collections ne peut pas être la somme des politiques individuelles ou particulières. Si l'on n'est que dans l'addition de ce qui se fait déjà, on ne*

¹¹⁵ Owens I. et Johnson K. (2019) One World Collection: The state of the world's natural history collections, BISS (Biodiversity Information Science and Standards), 3 : e38772

verra pas les « trous dans la raquette » et surtout on va manquer d'un regard macro, à grande échelle sur cette énorme matière. Comment on est capables de l'orienter avec des moyens adaptés ? Si c'est juste penser au niveau de l'individu et des petites équipes, ce n'est pas actionnable. Comme vient de le dire Line, les données sont, peut-être pas la solution, mais la vraie piste pour penser cette interopérabilité, cette interconnection entre les silos. Si on arrive à continuer de structurer les données d'une manière où celles-ci peuvent se parler, ça va mécaniquement tirer les possibilités d'interconnections entre les spécimens et aussi orienter la recherche. La deuxième idée que je voulais partager ce sont des termes que l'on utilise beaucoup en bibliothèque. On est en train de formaliser une politique documentaire pour la bibliothèque du Muséum. On est dans quelque chose qui nous paraissait inconciliable. On fonctionne dans deux temporalités, fondamentalement différentes. Il y a un temps chaud et un temps froid. Le temps chaud, c'est le temps de la recherche. Un projet de recherche, je ne sais pas si vous serez d'accord pour dire qu'en gros c'est sur 15 ans. C'est le temps d'un financement récurrent. C'est aussi le temps d'une génération qui va travailler sur quelque chose et ça va bouger. Il faut absolument que les collections soient au service de la recherche au moment où elle se fait. On doit avoir une dynamique chaude, réactive où on est capables, lorsqu'il y a un projet de recherche, quand il y a une équipe de recherche qui se monte sur une thématique, d'être là pour mettre à la disposition les données et le matériau dont le projet a besoin. Il y a aussi une temporalité froide de beaucoup plus long terme, qui est particulièrement pertinente en taxonomie, c'est que l'on est sur la longue traîne. On utilise beaucoup d'informations rares et très dispersées, et qui ont besoin de sédimenter dans un matériau qui est très long. Ce serait une erreur de se concentrer uniquement sur la partie chaude, parce que sur les générations de recherche futures, on perdrait des fondamentaux. On a besoin en parallèle de continuer à structurer des grandes branches qui sont peut-être assez classiques, assez attendues, très propres à la manière dont la taxonomie évolue, et de continuer à alimenter en ressources des choses qui sont peut-être moins en usage aujourd'hui puisque moins en échos avec les tendances de la recherche. Il faut garder la continuité des données qui sont derrière, sinon dans le coup d'après, on sera perdus. Donc je trouve intéressant de penser chaud, froid et d'essayer d'arbitrer les ressources en fonction de ces approches.

Laurent Palka : Dans sa présentation, Adeline a parlé de collections dans le cadre de SPIPOLL, donc des sciences participatives, et Michel a énoncé les trois piliers et cité aussi des amateurs, qui vieillissent, qui disparaissent. Est-ce que les sciences participatives peuvent

être un relai et un autre pilier ? Je voudrais aussi savoir si les sciences participatives sont importantes au Muséum dans la collecte des échantillons et si oui, est-ce que c'est vrai pour les collections naturelles et les collections documentaires ?

Gaël Clément : *Depuis un an au niveau de l'établissement, il y a un très fort mouvement sur les sciences participatives qui se coordonnent, avec par exemple 65 MO qui sera transformé au 1er janvier en une nouvelle unité, qui va s'appeler MoSaic en formant un lien très fort Muséum-SU pour les collectes de données naturalistes. Gildas, les sciences participatives sont-elles également impliquées dans les données documentaires ?*

Gildas Illien : *C'est vraiment fondamental. Il y a eu une journée d'étude sur les sciences participatives et on m'avait demandé d'intervenir avec un regard plutôt historique, grâce à mes échanges avec les collègues du Muséum. Il y a un continuum évident avec les sociétés savantes, la manière dont les collections se sont constituées au Muséum et les sciences participatives. C'est dans l'ADN du Muséum. C'est aussi pour ça qu'on parlait d'un musée citoyen. On parlait de sciences citoyennes avant même que les Américains parlent de citizen science. Il y a presque deux siècles d'écart. C'est à la fois un principe économique mais aussi une modalité participative dans la manière dont les collections ont été faites. Il y a toujours des amateurs, des passionnés, des gens de la rue ou de la campagne qui ont toujours été dans la construction des collections dans différents rôles. Que l'on retrouve aujourd'hui encore avec les équipes de bénévoles qui travaillent dans les collections. C'est un vrai sujet de redynamiser et de relancer ce travail bénévole dans les collections tout en étant vigilant bien sûr en cherchant toujours des emplois de titulaires par ailleurs. Le continuum que l'on devrait pouvoir créer aujourd'hui est cette contribution physique à la collecte mais aussi à la préparation et au traitement des collections. On pourrait essayer de faire un pont plus net avec les internautes qui agissent à distance sur les données. Il y a là un vrai coup à jouer sur le long terme. Pour les collections documentaires, il n'y a pas d'exemple au Muséum. On va parler plutôt de Crowdsourcing¹¹⁶ ou de métadonnées sociales, c'est-à-dire de demander aux gens par exemple, sur des collections qui ont été océrisées, de corriger l'OCR¹¹⁷. Il y a également le domaine des grandes campagnes de numérisation d'images où il existe un vrai besoin qui est identique à ce que l'on voit pour les herbonautes. On a par exemple de très*

¹¹⁶ Le crowdsourcing est l'utilisation du plus grand nombre, notamment des internautes, pour réaliser un travail, pour trouver de la créativité, de l'intelligence et du savoir-faire.

¹¹⁷ *optical character recognition* ou reconnaissance optique de caractères : un système OCR part de l'image scannée donc numérique d'un document imprimé ou dactylographié pour produire un fichier texte.

gros corpus de photographies en lien avec des fouilles archéologiques ou autres, des photos de campagnes d'ordre ethnologique. On aurait vraiment intérêt à travailler sur ce mode d'approche. Ce que je trouve intéressant c'est justement, comme on a cette ingénierie reconnue sur les sciences participatives au Muséum, qu'on essaie de la décliner sur des corpus d'images ou ocrisés et également des fonds d'archives à des fins de transcription d'archives qui sont à la fois utiles du point de vue de l'histoire des sciences et du point de vue naturaliste pour retrouver, sur les carnets de terrain ou autres, des informations utiles à la recherche. Je pense que c'est effectivement un pilier en lien avec le passé et les sociétés savantes qui ont fait le Muséum et un pilier pour l'avenir parce que c'est une manière de travailler l'économie de nos données avec les gens. C'est quelque chose qui a été beaucoup discuté à la DGD collections quand on a travaillé sur le projet scientifique et culturel de l'établissement. C'est aussi une forme d'engagement, c'est-à-dire que quelque part travailler sur les sciences participatives, c'est aussi être dans la diffusion, dans la mobilisation des gens autour des enjeux de société et des problématiques qu'on défend. C'est gagnant-gagnant.

Gaël Clément : *Il y a un public acquis qui travaille déjà, soit en tant que bénévole, soit en tant qu'amateur, soit dans des associations, qui répond aux sciences participatives genre SPIOLL et d'autres. Mais une des missions principales de l'établissement est aussi d'aller chercher et d'impliquer le public peu sensibilisé aux sciences. Le contexte actuel demande un peu d'urgence par rapport à ça. Je pense qu'il y a aussi un intérêt, sans ne faire que ça évidemment, d'identifier de grandes questions sociétales qui posent des questionnements auprès du grand public. Ça permettrait de l'impliquer au niveau de la recherche qui se fait au sein de l'établissement, et d'avoir un peu plus d'informations et de possibilités de diffusion auprès de ce public. On a toujours l'impression quand on travaille sur nos spécimens que c'est une recherche pour une communauté relativement fermée de chercheurs. Assez rarement on essaie d'imaginer à quel point la publication qui va être diffusée après, potentiellement par les journalistes, va avoir un impact. On ne sait jamais si effectivement il y aura un retour ou pas, et s'il y aura une influence quelconque auprès du grand public. Mais je pense qu'on peut réussir à coordonner les choses en faisant de la recherche sur nos collections. J'ai noté quelques exemples. Une chose assez primordiale en ces temps d'obscurantisme - Guillaume (Lecointre) n'est pas là et il le dirait bien mieux que moi –sur le concept d'évolution. Si ce n'est pas le Muséum qui prend ça en main, je ne sais pas qui le fera. On a des possibilités de montrer des preuves de l'évolution. Au niveau d'organismes qui se reproduisent très vite et chez lesquels on peut visualiser des choses. Vincent fait beaucoup de travaux depuis plus de*

10 ans sur les daphnies et les papillons. Pour tout ce qui est évolution, que ce soit phénologique, morphologique, à partir de la période postindustrielle, on peut montrer énormément de choses quand même assez frappantes. Cela a été bien montré sur les éristales¹¹⁸ comme sur certaines plantes. Ce sont les preuves de l'évolution « naturelle ». Ensuite, quel est l'impact des changements globaux et de l'implication de l'homme dans ces changements. Donc un premier point pourrait être d'identifier l'évolution naturelle et sa vitesse. Un deuxième point, on l'a vu aussi en ces temps encore une fois de renfermement, de nationalismes disons le mot, c'est sur tout ce qui est migrations humaines, comme ça a été dit aussi. Quand on arrive à identifier la complexité des migrations passées, ça peut aussi donner lieu à des réflexions et des clés par rapport à ce qu'il se passe actuellement au niveau international. L'immigration au cœur de l'histoire de l'humanité. Perle l'a dit tout à l'heure. Il y a également des choses plus précises comme la diversité intestinale en bactéries qui est très basse dans les milieux urbains. Est-ce que c'est lié à l'environnement, à la médication, etc. ? Autant de questions qui peuvent intéresser le grand public au niveau sociétal où on se dit que, même si ce n'est pas forcément dans nos disciplines ou nos approches habituelles, le Muséum a réellement une voix à porter. Encore une fois, je pense que le Muséum est l'institution nationale qui a le plus de crédibilités dans son discours scientifique. Il faut travailler là-dessus parce qu'un jour, et ça commence déjà, certains mettront en doute la parole des scientifiques. Un dernier point avec, bien sûr, l'érosion de la biodiversité, en tout cas les déséquilibres, face aux changements globaux, avec ou sans impacts anthropiques. Mais il faut montrer ces résultats, dans des articles scientifiques qui sont sans doute un peu abscons pour le grand public, et à chaque fois en faisant l'effort, soit nous-mêmes soit en passant par les services de communication du Muséum, de le traduire et de le vulgariser, même si le mot n'est pas beau. Ça permettrait d'avoir de plus en plus de visibilité et de communication auprès du grand public sur ces questions-là, ce qui peut-être nous ferait venir de nouveaux acteurs pour les sciences participatives, de nouveaux étudiants, parce que ce sont des questions qui leur importent au premier chef.

Laurent Palka : Quand on a préparé cette journée, on s'est posé une question sur une des cinq missions du Muséum, l'expertise. Est-ce qu'il existe une expertise institutionnelle dans le champ de l'évolution au Muséum ? La réponse n'est pas évidente, pourquoi ? J'ai interrogé Jean-Denis qui m'a répondu que c'était une très bonne question et qu'il fallait y réfléchir. Tout en préparant cette journée, j'ai assisté à des séminaires, dont un sur l'originalité

¹¹⁸ Les éristales sont des insectes diptères de la famille des Syrphidae.

phylogénétique et ça a fait tilt. Il y a un programme anglais qui s'appelle EDGE¹¹⁹ qui met en regard ou qui croise l'originalité phylogénétique et les statuts UICN des espèces. Ça veut dire que la phylogénie, les marqueurs, l'approche évolutive, peuvent être un outil dans l'étude de la biodiversité et dans les questions concernant le statut de conservation de telle ou telle espèce. C'est dommage, Philippe Grandcolas devait venir au moins une partie de la journée. Il n'a pas pu sûrement. J'aimerais bien savoir si le Muséum est déjà engagé ou va s'engager dans quelque chose comme le programme EDGE pour croiser l'originalité phylogénétique et les statuts UICN des espèces ?

Gaël Clément : *Ca fait très longtemps qu'il y a de l'expertise institutionnelle au niveau de l'établissement. Pour les plus anciens, dont je suis, ce n'était pas très visible. Ce n'est pas du tout une critique. Depuis la réorganisation, c'est beaucoup plus identifié, beaucoup plus structuré et renforcé. Il y a des personnes au sein de l'expertise, Vincent Hulin en particulier, qui a d'abord travaillé, et il faut lui laisser le temps, sur cette réorganisation de l'expertise au sein de l'établissement et qui est très demandeur de ce genre d'échanges avec les enseignants-chercheurs et les chercheurs. Pas uniquement pour apporter un appui sur un inventaire ou autre, mais pour avoir une politique scientifique un peu plus large, un peu plus étendue. Ça peut être sur l'UICN. Ça peut être aussi, puisque l'on sait que les organismes peuvent parfois évoluer très vite lorsqu'il y a des changements environnementaux brutaux, d'apporter une expertise à une demande territoriale ou ministérielle sur le suivi de l'évolution d'un écosystème dans le cadre de l'implantation d'une structure, et ne pas faire seulement un inventaire avant et après. Là encore, ce sont des choses qui peuvent être mises en place. Il faut par contre nous laisser un peu de temps, parce que l'expertise se construit et est en cours de finalisation. Mais l'établissement va revenir vers vous, chercheurs et enseignants-chercheurs, pour voir à quel point et comment vous souhaitez contribuer à l'expertise institutionnelle sur des grandes questions d'évolution. Enfin, cet après-midi, deux intervenants ont posé des questions au cours de leur présentation sur le problème complexe de la valorisation des spécimens tout en préservant leur conservation. Peut-être que Michel peut dire un mot, mais ce qui est certain c'est que le problème est pris également à bras le corps. C'est suivi. Il y a dorénavant une commission des prélèvements dans chacune des UGC¹²⁰.*

¹¹⁹ EDGE est un programme de conservation qui se focalise sur les taxons menacés qui ont une originalité dans l'arbre du vivant, par exemple des taxons qui ont très peu de parents proches et dont l'extinction ferait disparaître un pan unique de l'histoire évolutive.

¹²⁰ Unité de gestion et de conservation

Michel Guiraud : *Par rapport à ce que disait Damien, il ne faut pas penser que valorisation et conservation s'opposent même si les deux sont des activités contradictoires. Voilà comment je vois les choses. La conservation et la valorisation sont de l'information et un objet unique, l'information. C'est un objet qui a deux formes. Je crois que Gaël l'a dit à un moment donné. L'objet physique contient de l'information potentielle, cachée et tout ce qu'on en fait, c'est de l'information exprimée. A partir du moment où l'on prend tout ça en disant c'est un ensemble, et ça rejoint ce que dit Gildas, quelque part c'est de la donnée. On conserve cet objet d'information sous ses deux formes. La difficulté est la transformation de la forme matérielle dans la forme virtuelle. Quand on le prend comme ça, on voit qu'on est obligés de mener les deux de front. Les questions qui se posent alors, et c'est pour cela qu'il y a des responsables de collections, sont : Est-ce que ça en vaut la peine ? Quelles sont les données qui existent déjà ? Avec des principes simples aussi comme celui de conserver la preuve. Si l'ensemble du spécimen est détruit, ce qui a été dit est la vérité puisqu'il n'y a plus moyen de vérifier. Il existe des règles simples. Par exemple dans la collection de météorites, on avait pour principe de détruire 10% par génération. Ça veut dire qu'il restera toujours du matériel d'autant que l'on se dit aussi que les techniques évoluent. Avant il fallait 1 kg aujourd'hui il faut 1 gramme, demain ce sera 1 mg. C'est en ayant cette notion d'objet unique sous deux formes, encapsulées, qu'on arrive à résoudre la contradiction entre la conservation et la valorisation. La conservation ne peut pas être : on met tout dans une pièce dans de bonnes conditions, on ferme à clé et on jette la clé pour que 50 ans après quelqu'un la trouve, ouvre et découvre le spécimen en bon état. Il en est de même pour la valorisation. Voilà, je prends la Joconde et je la passe à la moulinette parce que ce qui m'intéresse, c'est le pigment jaune. Au bout du compte, j'ai détruit la Joconde mais je connais la nature du pigment. Il faut qu'on arrive à gérer en même temps la conservation et la valorisation. Les commissions de prélèvements sont là pour ça. Vu tous les enjeux, les générations futures, les intérêts patrimoniaux, ceux de la recherche, etc., on a jamais raison tout seul. Il faut qu'il y ait plusieurs regards. C'est la combinaison de tous ces regards qui va permettre de prendre une décision. C'est tout cela que l'on conserve et Gildas a raison sur les données, la conservation des données et l'interopérabilité. Je pense que si on le prend comme ça, on arrivera à résoudre la contradiction.*

Laurent Palka : *La contradiction dont tu parles concerne les collections patrimoniales. Mais si on parle des collections d'étude, il n'y a pas de contradiction.*

Michel Guiraud : *C'est pareil, même pour le matériel d'étude. Il faut se rendre compte qu'aujourd'hui les collections, on les vend entre guillemets par l'aspect historique en disant : même si c'est un tout petit insecte par exemple, c'est un état de la biodiversité, de la nature à un instant donné. Il est minuscule, c'est trois fois rien, etc., mais c'est le seul qu'on ait. C'est la profondeur historique avec le matériel d'étude. D'ailleurs on s'en rend compte. Prenez un ancien matériel d'étude qu'on a patrimonialisé. Pourquoi ? C'est la loi qui l'a patrimonialisé. Il n'y a pas de processus intellectuel qui regarde si on le garde ou pas. C'est pour ça que le matériel d'étude a la même fonction. La question qui se pose, c'est comment on le fait passer en collections patrimoniales, comment on le conserve puisque le nombre de mètres carrés et d'étagères est limité. Encore une fois, si on prend l'objet en tant qu'information, il faut rechercher s'il y a de la donnée, de l'information potentielle ou exprimée, que ce soit du matériel d'étude ou pas.*
