

Biomarqueurs moléculaires des interactions passées entre le climat, les écosystèmes, et les sociétés : De l'allégorie de la caverne d'Ali Baba à la Géochimie Organique du ressenti et des sens.

Jérémy Jacob

▶ **To cite this version:**

Jérémy Jacob. Biomarqueurs moléculaires des interactions passées entre le climat, les écosystèmes, et les sociétés : De l'allégorie de la caverne d'Ali Baba à la Géochimie Organique du ressenti et des sens.. Géochimie. Université d'Orléans, 2019. tel-02162030

HAL Id: tel-02162030
https://insu.hal.science/tel-02162030

Submitted on 21 Jun 2019

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

HDR présentée par :

Jérémy JACOB

soutenue le : 28 mai 2019

Discipline/ Spécialité : Sciences de l'Univers

Biomarqueurs moléculaires des interactions passées entre le climat, les écosystèmes, et les sociétés : De l'allégorie de la caverne d'Ali Baba à la Géochimie Organique du ressenti et des sens

RAPPORTEURS :

Vincent GROSSI	Directeur de Recherche CNRS au LGLTPE
Philippe SCHAEFFER	Directeur de Recherche CNRS à l'ICS
Régis MOILLERON	Professeur de l'Université de Paris-Est Créteil au LEESU

JURY:

Fabien ARNAUD	Directeur de Recherche CNRS à EDYTEM
Ary BRUAND	Professeur de l'Université d'Orléans à l'ISTO
Sylvie DERENNE	Directrice de Recherche CNRS à METIS
Marie-France DIGNAC	Chercheure INRA à ECOSYS

"S’il a fallu se spécialiser pour apprendre, il faut savoir s’ouvrir pour comprendre"
- François Kourilsky

RÉSUMÉ

L'histoire de la Terre est riche d'expériences passées dont nous pouvons nous nourrir pour anticiper les trajectoires futures des milieux continentaux sous les pressions anthropiques et climatiques. Cette histoire est gravée dans la postérité géologique que constituent les archives sédimentaires, à condition de disposer des outils pour les décrypter. En ma qualité de géochimiste organicien, j'ai exploré de nouveaux biomarqueurs moléculaires et développé la mesure de leurs compositions isotopiques pour retracer l'évolution des végétations du passé, des variables du climat et des activités et impacts des sociétés humaines sur l'environnement. La formidable diversité de ces fossiles moléculaires et leurs applications innombrables ne doit pas masquer les questions évidentes de leurs représentativités temporelles, spatiales et quantitatives qui peuvent altérer notre perception des mondes anciens.

Le futur des activités paléoenvironnementales est sans doute à ancrer dans le quotidien, en transposant les approches biomarqueurs/sédiments développées sur des systèmes naturels aux contextes anthropisés et actuels/récents, tels que les socio-écosystèmes urbains, pour être au plus près des populations et pour répondre aux enjeux de notre temps. Je propose finalement d'engager les travaux des environnementalistes, paléoenvironnementalistes et géochimistes organiciens dans une approche sensorielle.

REMERCIEMENTS 8
BILAN DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES 10
I. Préambule 11
II. Outils moléculaires et isotopiques du diagnostic environnemental – la Caverne d'Ali Baba 14
1. Biomarqueurs moléculaires des végétations 14
a) Les PTMEs, traceurs de Gramineae 14
b) Marqueurs de Pinacées 14
c) Marqueurs d'Astéracées 15
2. Traceurs des activités humaines / de l'anthropisation 15
a) Marqueurs fécaux 16
b) Marqueurs d'usage et d'occupation du sol 16
c) Le cannabinol, marqueur du rouissage du chanvre 17
3. Développement d'un nouveau proxy des variations hydrologiques 17
a) Facteurs affectant le δ^2H de la miliacine 18
b) Origine de l'oxygène de la miliacine 18
c) Hétérogénéité de distribution du deutérium au sein des molécules 18
d) Pertinence du δ^2H de la miliacine 19
e) Impacts de la diagenèse sur le δ^2H de la miliacine 20
III. Interactions hommes/milieux/climats durant l'Holocène 22
1. Culture du millet et évolution climatique dans les Alpes 22
2. Variabilité climatique et usage des sols en Auvergne 23
3. Evolution environnementale du Nord-Est du Brésil 24
4. Domestication/diffusion du millet 24
IV. Impacts des crises climatiques du Méso-Cénozoïque sur les écosystèmes continentaux .. 25
1. Impacts du PETM sur les environnements continentaux 25
2. Evolution des écosystèmes continentaux à la transition Eocène/Oligocène dans le graben de Rennes 25
3. Evolution climatique au Kazakhstan pendant le Lias 25
V. Pertinence et représentativité des traceurs et proxies moléculaires – la Caverne de Platon .. 26
1. La miliacine sédimentaire : est-ce vraiment un marqueur du millet cultivé ? 28
2. Quelles sont les relations quantitatives entre concentration d'un biomarqueur dans le sédiment et biomasse de son organisme source dans le bassin versant ? 29
a) Peut-on estimer la consommation en millet durant l'âge du Bronze ? 29
b) Peut-on estimer les paléopopulations de bétail ? 30
c) Comparaison pollen/biomarqueurs moléculaires 30
3. Quels sont les contrôles agissant sur la variabilité spatiale des biomarqueurs ? 31
a) Contrôles biologiques 32
b) Variabilité spatiale des valeurs de δ^2H moléculaire 32

4. Héritages moléculaires et paléousages 33
a) Evidences moléculaires d'un changement récent d'usage des sols 34
b) Evidences moléculaires d'un ancien sol de culture 34
c) La distribution spatiale de molécules dans les sols peut-elle témoigner des usages passés ? 35
5. Où sont localisés les biomarqueurs moléculaires ? 36
6. Homogénéité de l'enregistrement sédimentaire 36
a) La miliacine dans les sédiments du Lac du Bourget 37
b) Le PETM dans le bassin de Dieppe 37
7. Quelle est la signification temporelle des biomarqueurs moléculaires ? 37
a) Modalités de transfert plante-sol de la miliacine 38
b) Analyses ^{14}C sur fractions lipidiques 38
8. Intégration spatio-temporelle des biomarqueurs dans les archives sédimentaires 39
PROJET DE RECHERCHE 44
Vers une géochimie organique du ressenti et des sens 44
I. Prolégomènes – Indisciplinarité et créativité 44
II. Vers une géochimie organique du ressenti, une géochimie organique de l'Anthropocène 45
1. Motivations 45
a) Se connecter à la réalité/au quotidien 45
b) Se rapprocher de l'humain 46
c) Raccorder les temporalités 46
2. Opportunités : des sujets émergents 47
a) L'Anthropocène 47
b) Nouvelles matières de l'Anthropocène 48
c) L'Astysphère, nouveau territoire des géochimistes de l'Anthropocène 50
d) Relations avec la société 51
i. Sciences participatives 51
ii. Des outils d'évaluation et d'aide à la décision 52
3. Projet 53
a) Reconstruire une histoire urbaine intégrée, objective et multithématique 53
b) Explorer les accumulations sédimentaires dans les réseaux d'assainissement 53
c) Basculer des biomarqueurs "paléo" aux biomarqueurs "humains" 54
d) Raccorder les temporalités entre l'observation et la rétro-observation 55
i. Confronter des métriques physico-chimiques à des métriques sociétales 57
ii. Conclusion partielle 59
4. Premiers résultats 60
a) Evolution de l'urbanisation d'un quartier d'Orléans 60
b) Dynamique des polluants sur le temps court - Observation 60
c) Archivabilité du message sédimentaire 62

d) Construction de l'archive – Rétro-observation temps intermédiaire 62
e) Evolution de la ville d'Orléans sur plusieurs décennies – Rétro-observation temps long 65
f) Valorisation/vulgarisation 68
g) Perspectives 68
i. A Orléans – Projet Golden Spike 68
ii. A Paris dans le cadre d'OPUR 69
iii. A l'échelle des métropoles Européennes 69
iv. Accumulations sédimentaires de l'anthropocène hors réseau d'assainissement 69
h) One step beyond 70
III. Vers une approche sensorielle en géochimie organique 71
1. Introduction 71
2. Approches sensorielles en sciences de l'environnement 71
a) L'odorat 71
b) Le goût 72
c) L'ouïe 72
d) La vue 72
i. Les couleurs 72
ii. Voir les biomarqueurs 73
e) Le toucher 74
3. Décrire nos échantillons par les sens 74
4. Décrire les écosystèmes actuels par les sens 77
5. Retracer les ambiances sensorielles passées 78
6. Les sens comme vecteurs de médiation 79
CURRICULUM VITAE 80
I. Thématiques de recherche 80
II. Formation 80
III. Expérience professionnelle 80
IV. Compétences analytiques 81
V. Responsabilités analytiques 81
VI. Activités pédagogiques 81
1. Enseignement 81
2. Encadrement 81
a) Postdoctorants et chercheurs invités 81
b) Doctorants 82
c) Stages M2 82
d) Stages M1 82
e) Licence 3 83
f) Stages DUT 83

VII. Projets soumis/acceptés/refusés 84
VIII. Animation scientifique 85
1. Sociétés savantes et réseaux 85
2. Participation à l'organisation de Conférences / Ecoles Chercheurs / Colloques 85
3. Organisation de sessions lors de congrès 85
4. Evaluation de projets 85
5. Comités de sélection 86
6. Comités de thèse 86
7. Participation à jurys de thèse 86
8. Bases de données 86
9. Activité éditoriale 86
10. Actes de congrès 86
11. Exercices de prospective 87
12. Responsabilités à l'ISTO et à l'OSUC 87
IX. Diffusion de la culture scientifique 87
1. Actions de communication dans les écoles, collèges et lycées, conférences grand public 87
2. Activité sur le web 87
3. Articles de vulgarisation 88
4. Communiqués de presse CNRS 88
5. Articles de presse 88
PRODUCTION SCIENTIFIQUE 89
I. Eléments bibliométriques 89
II. Thèse 89
III. Publications de rang A 89
1. Publiées 89
2. En préparation 92
IV. Publications de rang B 93
V. Communications à congrès 94
1. Communications orales à congrès 94
2. Affiches 103
VI. Séminaires invités 109

REMERCIEMENTS

Le métier de chercheur a ceci de formidable… qu'on y rencontre des gens formidables. Ce document est l'occasion de leur témoigner de mon respect et de mon affection.
Mes remerciements vont immédiatement aux rapporteurs (Régis Moilleron, Vincent Grossi et Philippe Schaeffer) et membres du jury (Sylvie Derenne, Marie-France Dignac, Fabien Arnaud, Ary Bruand et Marc Desmet) qui ont accepté de juger ce manuscrit.
Je voudrais rendre hommage à ceux qui ont déclenché l'étincelle en m'orientant vers la géologie, la sédimentologie, mais aussi l'archéologie : Sully Jacob, mon grand père, avec lequel je parcourais les terrasses de la Somme à la recherche de fossiles et de bifaces. Mme Claudine Depigny en prépa, puis les enseignants en Sciences de la Terre à Amiens (M Beauchamps, M Beun), à Dijon (M Bonvalot, M Loreau, M Menot, M Marchand), à Oxford (M Fowley) mais aussi Alain Boucher, Tahar Ben Redjeb, Jean-Pierre Fagnard qui ont ouvert mon intérêt à l'archéologie.
Il y a aussi et surtout ceux qui ont soufflé sur les braises en provoquant ma curiosité pour la géochimie organique : Jean-Robert Disnar et Geoffrey Eglinton. Durant les premières années, j'ai partagé ces braises avec mes compagnons d'infortune et amis : Yoann Copard, Cyril Marchand, Pierre Nzoussi et Hervé Noël.
Un grand merci aux collègues de qui entretenu et attisé mes passions au quotidien : Christian Di Giovanni, Claude Le Milbeau, Anaëlle Simonneau, Pascale Gautret, Olivier Monod, Dominique Panis, Bernard Guillet, Fabrice Muller, Jean Trichet, Elisabeth Vergès, Fatima Laggoun, Simo Boussafir, Rachel Boscardin, Marielle Hatton, Nathalie Lottier, Olivier Geoffroy, Virginie Lancelot, Marie-Noëlle Pailhes, Fabienne LeBihan, Stéphane Bouquet, Fabienne Gentillet, Catherine Leroy, Carole Reddy, Chantal Genter. Un grand merci à tous pour ces interactions constantes et enrichissantes.
J'ai profité également de l'aide du Service Partenariat et Valorisation de la DR08 (Christophe Terrasse, Matthieu Sammut et Camille Seze-Goismier) et des facilitateurs que sont le Pôle DREAM Eau et Milieux (Daniel Pierre, Denis Groeninck, Romain Talva, Miguel Marteau), Le Studium (Jancik Brabant, Marie-Frédérique Pellerin, Sophie Gabillet, Paul Vigny, Michèle Scherer) et Orléans Val de Loire Technopôle (Marie-Pierre Papet, Frédéric Ros).
Durant ces 15 premières années, j'ai aussi eu la chance d'apprendre de mes étudiants : Nicolas, Sylvain, Marlène, Alexandre, Maxime, Joana, Estelle, Dalal, Gabrielle, Frédéric, Catherine, Manon, Renata, Quentin, Benjamin, Aurélie, Franck, Maelys, Romain, Typhaine… en espérant leur avoir, un peu, parfois, transmis la flamme. Un grand merci également à ceux dont la mission est, justement, de transmettre et avec lesquels j'ai été ravi de travailler : Florence Royer à la communication de la DR08, Centre.Sciences (Olivier Morand, Djamel Hellal Marie-Laure Thurier, Priscilla Fouché, Guy-Antoine Dufourd), le rectorat (Jean-Marc Vallée) ainsi que les collègues du primaire et du secondaire avec lesquels j'ai eu la chance d'interagir.
Quelques lignes enfin pour remercier les collègues d'horizons divers avec lesquels j'ai pu collaborer dans le cadre de projets, sociétés savantes ou réseaux : Filipe Franco et Benjamin Marceau (FabLab Orléanais), Yves Dudal, Marie-France Dignac, Claire Bastien, Pierre Faure, Delphine Derrien (ResMO), Vincent Grossi, Laurent Jeanneau, Laurent Grasset, Armelle Riboulleau, Pierre Adam, Sylvie Derenne (FROGs), Franck Poitrasson, Pascal Flament, Thanh Thuy N'Guyen Tu, Luc Lambs, Edgar Soulié et François Fourel (SFIS), Loic Thomas, Axel Aurouet, Bruno Falala et Morad Madani (Géo-Hyd/ANTEA), Jean-Gabriel Bréheret (GEHCO), Valery Terwilliger (University of Kansas), Roland Benoît (CRMD), Matthieu Exbrayat, Sébastien Limet et Sophie Robert (LIFO), Fabien Arnaud, Jérôme Poulenard, Yves Billaud et Pierre Sabatier (EDYTEM), Hélène Tissoux, Florence Quesnel, Hugues Bauer, Nolwenn Hervio et Luigi Ardito (BRGM), Laurent Augustin et Patrick Moya (C2FN), Abdelfettah Sifeddine et Bruno Turcq (IRD), Christine Hatté et Marie-Alexandrine Sicre (LSCE), Emilie Destandau et Laetitia Fougère (ICOA), Chloé Robin, Lucile Mollet, Fabienne Brulé et Eric Duverger (CBM), Philippe Lesot (ICMMO),

Florentin Paris (Géosciences Rennes), Marilyn Fogel (University of California at Riverside), Alain LePape et Stéphanie Lerondelle (CIPA), Bertrand Poissonnier, Edith Rivoire, Sophie Lardé et Morgane Liard (INRAP), Giedre Motuzaite-Matuceviciute, Martin Jones et Harriet Hunt (Cambridge), Thierry Bariac, Philippe Biron et Patricia Richard (Bioemco), Yongsong Huang et Catherine Hanni (Brown University) et Christian Dupuis (Université de Mons).

J'espère que la postérité sédimentaire retiendra l'amour inconditionnel que je porte à ma famille, à ma femme et à mes enfants.

A Christian

Biomarqueurs moléculaires des interactions passées entre le climat, les écosystèmes, et les sociétés :

De l'allégorie de la caverne… d'Ali Baba à la Géochimie Organique du ressenti et sensorielle

BILAN DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES

I. Préambule

Notre capacité à anticiper les impacts des activités humaines et des changements climatiques est fortement dépendante de notre connaissance d'évènements qui ont ponctué l'histoire de la Terre. Il ne s'agit plus simplement d'anticiper les conséquences sur les cycles biogéochimiques, le climat, mais également les conséquences socio-économiques et politiques de tels bouleversements.

"L'avenir, c'est du passé en préparation" – Pierre Dac[1]

Les transitions climatiques majeures (limites Paléocène/Eocène et Eocène/Oligocène), les états de référence drastiquement différents de celui qui prévaut actuellement (SnowBall Earth, IceHouse/GreenHouse, cycles glaciaire/interglaciaire), les grands sauts technologiques ou d'organisation des sociétés humaines (Néolithique, Révolution Industrielle) constituent autant d'expériences antérieures dont l'étude doit permettre de comprendre la nature et l'intensité des forçages, les mécanismes de rétroaction ou les relations entre compartiments (hydrosphère, biosphère, atmosphère, géosphère…).

Les études paléoenvironnementales se fondent sur un archivage de ces évènements dans des sédiments, sols, tourbes, cernes d'arbres ou coraux. La difficulté pour le paléo-environnementaliste est de déceler et d'interpréter dans ces archives des indicateurs lui permettant de reconstituer le plus fidèlement possible les conditions environnementales qui régnaient dans le bassin versant (ou dans la colonne d'eau) au moment de la formation de l'archive. Le paléoenvironne-mentaliste (Figure 1) doit ainsi lire entre les lignes, entre les strates. La diversité de nature des matières archivées (fragments, molécules, éléments, isotopes ; biotiques, abiotiques…) égale à peine la diversité des critères qui permettent de définir les conditions environnementales. Celles-ci comprennent les conditions climatiques (température, précipitations, ensoleillement…), bien sûr, mais aussi les conditions physico-chimiques qui prévalent dans différents milieux que draine l'archive (pH des sols, des eaux, nature géologique des substrats…) et les éléments biologiques qui s'y développent (nature des communautés végétales et animales peuplant le milieu, communautés bactériennes, sociétés humaines…).



Figure 1 : Affiche officielle du Mentaliste, ré-interprétée.

L'une des difficultés majeures auxquelles est confronté le paléoenvironnementaliste est de définir des indicateurs les plus univoques possibles de leurs sources, des conditions environnementales, ou des processus dont ils témoignent. Selon la nature des objets considérés (fossiles, pollens, débris, molécules) la relation source-produit est plus ou moins aisée et univoque. Le challenge est donc de définir des indicateurs les plus pertinents, en gardant à l'esprit que le scenario le plus abouti (qui n'est pas forcèment la Vérité) que nous pouvons dresser sur les changements environnementaux passés doit s'appuyer sur une gamme d'indicateurs la plus large possible (le fameux multi-proxy !).

[1] Citation qui anticipait le film "Living in Future's Past".

Dans la continuité de mes travaux de thèse, j'ai dans un premier temps poursuivi la recherche de biomarqueurs moléculaires (ou "fossiles moléculaires" : molécules dont la structure est suffisamment originale et préservée pour pouvoir être reliée à un taxon, celui-ci étant le plus restreint possible) dans les sols et sédiments. L'objectif est de disposer, pour décrypter les archives sédimentaires, de nouveaux traceurs permettant de reconstituer les écosystèmes du passé. De par la diversité des molécules qu'ils contiennent – qui est le reflet incomplet de la diversité chimique créée par le vivant -, les sols et sédiments constituent une véritable **Caverne d'Ali Baba** (Figure 2) et le champ des possibles pour découvrir de nouveaux marqueurs est rapidement apparu très étendu, voire illimité comme le notent Geoffrey et Tim Eglinton[2] : "The utility and applications of biomarkers may only be limited by our imagination"… aux problèmes de plomberie, et de financement.


Figure 2 : Fernandel dans "Ali Baba et les 40 voleurs" de Jacques Becker © Prod.

Je me suis d'abord focalisé sur les marqueurs chimiotaxonomiques permettant d'attester la présence de flores anciennes. Très vite, et suite à la découverte de la miliacine, marqueur du millet cultivé[3,4,5], j'ai orienté mes recherches vers de nouveaux biomarqueurs moléculaires permettant d'attester de l'emprise des sociétés humaines sur les écosystèmes. Il existait/existe en effet un fossé méthodologique et disciplinaire entre les études archéologiques qui se focalisent sur des contextes fortement anthropisés, dans des trames temporellement fines mais réduites, et spatialement contraintes, et les études paléoenvironnementales qui sont réalisées à l'échelle d'un bassin versant ou d'un paysage sur des périodes plus longues. D'un côté des informations très précises sur les sociétés humaines, mais sans vision globale du cadre environnemental, de l'autre, une vision intégrée de l'évolution des milieux de laquelle l'influence humaine est parfois difficile à distinguer. L'un des volets les plus porteurs (et productifs) de mes activités a donc été de développer des nouveaux biomarqueurs moléculaires préservés dans les archives sédimentaires susceptibles de décrire la présence et l'activité des sociétés humaines dans un bassin versant.

Un volet conséquent de mon activité a aussi été dédié à la caractérisation de dérivés diagénétiques de triterpènes pentacycliques afin de préciser les conditions de diagenèse de ces molécules si singulières.

En parallèle, j'ai participé au développement de proxies (paramètres d'approximation de variables environnementales[6]) moléculaires et isotopiques des paramètres climatiques. Après m'être frotté aux alcénones lors d'un postdoc au LSCE, j'ai développé à l'ISTO la mesure de la composition en isotopes de l'hydrogène δ^2H et du carbone $\delta^{13}C$ de molécules individuelles (par GC-irMS). J'ai, en fait, surtout développé la mesure du δ^2H moléculaire dans le but de quantifier les variations hydrologiques passées à travers le projet ANR JCJC PalHydroMil et la thèse de N. Bossard.

J'ai ensuite appliqué ces nouveaux outils au décryptage des archives sédimentaires afin d'estimer les impacts respectifs de l'anthropisation et des variations climatiques sur les milieux

[2] Eglinton, T.I., Eglinton, G., 2008. Molecular proxies for paleoclimatology. Earth and Planetary Science Letters 275, 1-16.
[3] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Vergès, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M. 2008. Millet cultivation history in the French Alps as evidenced by a sedimentary molecule. Journal of Archaeological Science 35, 814-820.
[4] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Bardoux, G., 2008. Carbon isotope evidence for sedimentary miliacin as a tracer of Panicum miliaceum (broomcorn millet) in the sediments of Lake le Bourget (French Alps). Organic Geochemistry 39, 1077-1080.
[5] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Arnaud, F., Gauthier, E., Billaud, Y., Chapron, E., Bardoux, G., 2009. Impacts of new agricultural practices on soil erosion during the Bronze Age in French Prealps. The Holocene 19, 241-249.
[6] Le terme "Proxy" est utilisé à toutes les sauces. J'en ai une lecture très precise : seul peut être considéré comme proxy une donnée calculée au moyen de traceurs ou marqueurs (biomarqueurs, pollens, éléments, isotopes…) qui peut être reliée mathématiquement à une variable environnementale (avec une unité, donc).

continentaux durant l'Holocène dans trois chantiers principaux : les Alpes, le Massif Central et le Nord-Est du Brésil. J'ai également entamé des collaborations pour exploiter la relation miliacine-millet (*Panicum miliaceum*) afin de préciser les modalités de la domestication et de la diffusion de cette plante durant la préhistoire.

Dans le cadre de deux thèses (Sylvain Garel et Julie Ghirardi), ces outils moléculaires et isotopiques ont été appliqués pour évaluer les conséquences de deux transitions climatiques majeures du Cénozoïque (les limites Paléocène/Eocène et Eocène/Oligocène) sur les écosystèmes continentaux.



Figure 3 : Allégorie de la Caverne de Platon.
Source : http://fr.nextews.com/d06f1703/

Les archives sédimentaires recèlent des informations essentielles à notre compréhension des phénomènes passés ayant affecté les surfaces continentales, nécessaires pour mieux anticiper leur évolution future en réponse aux forçages climatiques et anthropiques. Néanmoins, et à l'instar de **l'Allégorie de la Caverne de Platon** (Figure 3), elles constituent une image filtrée, biaisée, partielle, des écosystèmes anciens. L'interprétation des signaux qui y sont préservés est dépendante de notre faculté à les décrypter. J'ai cherché à comprendre ces filtres multiples qui peuvent agir à plusieurs niveaux/selon plusieurs échelles : représentation de l'hétérogénéité spatiale des bassins versants, représentation de la biodiversité, décalages temporels, hétérogénéité de l'archivage, impacts de la diagenèse, relations quantitatives.

II. Outils moléculaires et isotopiques du diagnostic environnemental – la Caverne d'Ali Baba

1. Biomarqueurs moléculaires des végétations

Depuis son origine que beaucoup attribuent à Alfred Treibs, la géochimie organique a été largement dédiée à des questions énergétiques (pétrole, charbon, etc). Elle a opéré une bascule vers des questions paléoenvironnementales et environnementales dans les années 60, 70, 80 sous l'impulsion de quelques pionniers dont G. Eglinton ou P.A. Cranwell. Cette bascule a vu le développement des biomarqueurs moléculaires extraits de sédiments, depuis des composés peu spécifiques vers des composés qui permettaient une identification plus précise de leurs organismes source. En particulier, l'école strasbourgeoise mais également J. Rullkötter ou B. Simonneit se sont intéressés aux marqueurs des végétaux vasculaires. Je me suis largement inspiré de leurs travaux dans le cadre de ma thèse durant laquelle j'ai été rapidement confronté à des molécules originales préservées dans les sédiments du Lac Caço. Il ne s'agissait pas de l'objectif initial de cette thèse, mais bluffé par la diversité et l'originalité des composés présents dans les extraits, j'ai souhaité réorienter mes recherches sur ce sujet. Ces travaux nous ont permis révéler des molécules organiques peu voire jamais décrites dans des échantillons géologiques, alors que connues par les phytochimistes. Un monde s'ouvrait sur ces molécules originales, souvent à l'état de traces, et sur leur potentiel pour retracer les écosystèmes anciens.

a) Les PTMEs, traceurs de Gramineae

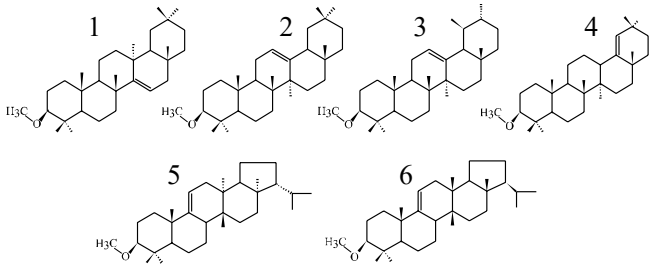


Figure 4 : Quelques exemples d'éthers méthyliques de triterpènes pentacycliques : 1-crusgalline, 2-sawamilletine, 3- α-amyrine méthyle éther, 4- miliacine, 5- arundoïne, 6-cylindrine.

Lors de l'étude des sédiments du lac Caço, j'ai décrit pour la première fois dans des sédiments une série de triterpènes pentacycliques caractérisés par la présence d'un groupement méthyl éther en position 3 (PTME, Figure 4)[7].

Une étude bibliographique dans la littérature des phytochimistes a permis de définir ces biomarqueurs comme traceurs de graminées (exemple du millet, Figure 5). Depuis, ces biomarqueurs ont été détectés dans de nombreux échantillons. Ceux identifiés dans les sédiments du lac Boqueirao (NE Brésil) ont pu être rattachés à des variétés de graminées cultivées à proximité du lac pour la production de tapis de gazon à destination des terrains de football et de golf (*cf. infra* et Zocatelli et al., 2011[8]).

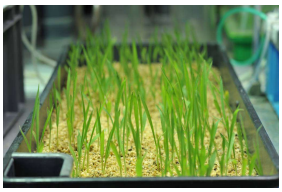


Figure 5 : Culture de *Panicum miliaceum* (millet, une graminée) à BIOEMCO pour les besoins du projet PalHydroMil. Crédits P. Biron

b) Marqueurs de Pinacées

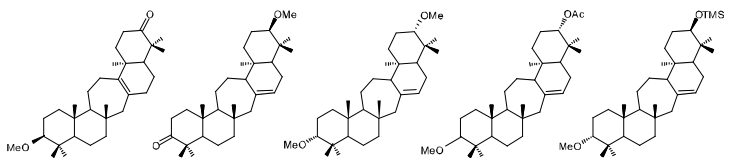


Figure 8 : Quelques exemples de méthoxy-serratènes.

Une seconde famille de composés (des triterpènes pentacycliques de type serratène comportant un groupement méthoxyle en position 3 ou 21; Figure 8) a été détectée dans les sols du bassin versant

[7] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2005. Pentacyclic triterpene methyl ethers in recent lacustrine sediments (Lagoa do Caçó, Brazil). Organic Geochemistry 36, 449–461.

[8] Zocatelli, R., **Jacob, J**., Turcq, B, Boussafir, M., Sifeddine, A. Bernardes, M.C., 2011. Molecular evidence for recent turf cultivation in Northeast Brazil (Lagoa do Boqueirão, RN). Organic Geochemistry 41, 427-430.

du lac d'Aydat[9]. Bien que les serratènes soient largement distribués dans les végétaux, la présence d'un groupement méthoxyle est uniquement décrite dans des Pinaceae. Aussi, ces nouveaux biomarqueurs pourraient constituer, lorsqu'ils sont détectés dans les sols et sédiments, des outils précieux pour tracer les phases d'emprise et de déprise de forêts de conifères, en particulier d'espèces cultivées par l'Homme.

c) Marqueurs d'Astéracées

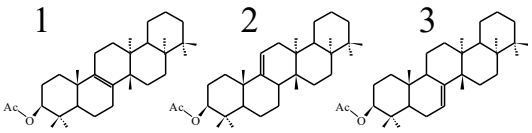


Figure 6 : Quelques exemples d'acétates de triterpényles : 1- acétate d'isopichiérényle, 2- acétate de pichiérényle, 3- acétate de swertényle.

Les sols du bassin versant du lac d'Aydat, étudiés dans le cadre de la thèse de Marlène Lavrieux, ont fourni une quinzaine d'acétates de triterpényles. Une étude bibliographique extensive (plus de 300 publications, 800 espèces étudiées) nous a permis de comprendre la distribution de ces composés dans les organismes vivants[10]. Il est apparu très rapidement que, si certains composés sont relativement communs à plusieurs groupes végétaux, les acétates de bauérényle, taraxastéryle, ψ-taraxastéryle, voire le lupéyle acétate, sont, de manière quasi-exclusive, produites par des astéracées. En particulier, trois composés originaux (swertényle, pichiérényle et isopichiérényle acétates, Figure 6), n'ont été décrits que dans une seule espèce : la picride épervière (*Picris hieracioides,* Figure 7).

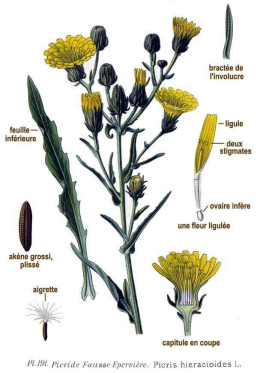


Figure 7 : *Picris hieracioides*. Source : Wikimédia commons.

2. Traceurs des activités humaines / de l'anthropisation

La détection de la miliacine dans les sédiments du lac du Bourget[3,4,5] a permis pour la première fois de retracer en continu l'évolution d'une activité humaine (la culture du millet) à partir d'archives sédimentaires. Dans la continuité de ces résultats, et dans le cadre de plusieurs projets (**Pygmalion**, **Erode**, **Otarie**), j'ai engagé un travail exploratoire pour rechercher de nouveaux marqueurs moléculaires extraits des sols et sédiments et pouvant témoigner des activités humaines. Mon attention s'est focalisée sur les triterpènes pentacycliques, une famille de composés que je connais bien depuis ma thèse et qui constituent, à mon avis, une cible privilégiée de marqueurs chimiotaxonomiques pouvant être utilisés pour reconstituer les interactions Homme-Climat-Ecosystèmes.

[9] Le Milbeau, C., Lavrieux, M., **Jacob, J.**, Zocatelli, R., Disnar, J.R., 2013. Diversity of methoxy-serratenes in a soil under a conifer forest evidences their potential as biomarkers of Pinaceae. Organic Geochemistry 55, 45-54.
[10] Lavrieux, M., **Jacob, J.**, LeMilbeau, C., Zocatelli, R., Masuda, K., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., 2011. Occurrence of triterpenyl acetates in soil and their potential as chemotaxonomical markers of Asteraceae. Organic Geochemistry 42, 1315-1323.

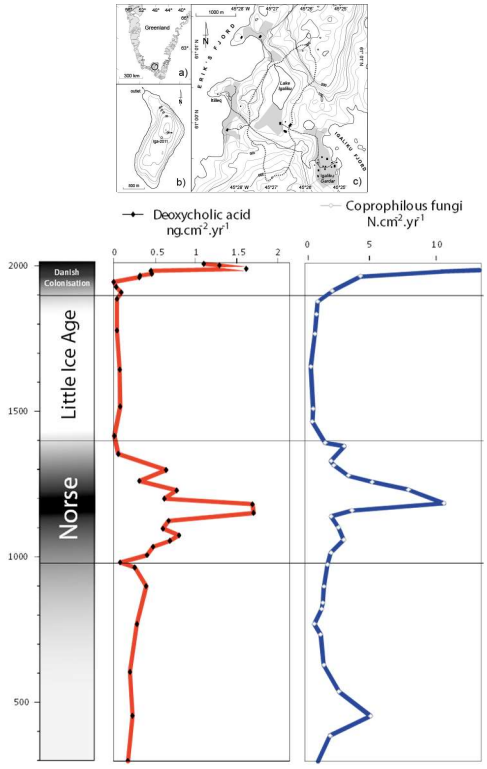


Figure 9 : Localisation du lac Igaliku et évolution des concentrations en acide déoxycholique et en spores de champignons coprophiles en fonction de l'âge des sédiments.

a) Marqueurs fécaux

L'analyse de la fraction acide des extraits lipidiques a livré, pour les sols sous prairies et pâtures, de l'acide déoxycholique, un acide biliaire, qui témoigne de la présence du bétail[11]. Nous avons également détecté et quantifié ce marqueur dans les sédiments du lac Igaliku (Figure 9), étudié dans le cadre de la thèse de T. Guillemot (Université de Franche Comté, Laboratoire Chrono-Environnement) dont le sujet de thèse s'intègre dans le projet ANR Green Greenland (resp. V. Masson-Delmotte, LSCE). L'acide déoxycholique est présent dans toute la série sédimentaire de ce lac depuis 1700 ans. Des concentrations plus élevées sont notées dans les sédiments déposés lors de l'occupation viking au Moyen-Age et dans les niveaux les plus récents correspondant à la colonisation danoise. Ils témoignent de l'élevage de bétail dans le bassin versant. Des concentrations plus faibles après le départ des vikings qu'avant leur arrivée pourraient témoigner d'un impact sensible et persistant des sociétés vikings sur la faune sauvage[12].

b) Marqueurs d'usage et d'occupation du sol

Nous avions émis l'hypothèse que le TTHC, un dérivé diagénétiques se formant à partir de molécules de type oléanane dans les litières des sols et détecté dans les sédiments du lac du Bourget, pouvait constituer un indicateur de l'érosion des sols[5]. Dans la continuité de ce travail, j'ai souhaité explorer d'autres molécules qui pourraient également témoigner de l'érosion des sols, voire de leur usage. En effet, la végétation (source de biomarqueurs) et les conditions physico-chimiques du milieu (impactant les voies de dégradation de ces biomarqueurs) résultent directement de l'usage qui est fait des sols (types de cultures, modes de gestion des sols, mais également substrats et conditions climatiques). Le projet **Erode** et la thèse de M. Lavrieux ont permis de définir de nouveaux indices et cortèges moléculaires pouvant témoigner des usages anciens des sols. L'analyse d'une trentaine de sols du bassin versant du lac d'Aydat (Massif Central) montre en effet des distributions contrastées en biomarqueurs moléculaires en fonction de la végétation dominante. Outre les résultats acquis sur la fraction acide[11]**Erreur ! Signet non défini.**, ce travail a permis de relever plusieurs familles de composés, la plupart originales, permettant le diagnostic de l'usage des sols[10,11].

[11] Zocatelli, R., Lavrieux, M., Disnar, J-R., Le Milbeau, C., **Jacob, J.**, Bréheret, J.G., 2012. Free fatty acids in Lake Aydat catchment soils (French Massif Central): sources, distributions and potential use as sediment biomarkers. Journal of Soils and Sediments 12, 734-748.
[12] Guillemot, T., Zocatelli, R., Bichet, V., **Jacob, J.**, Gauthier, E., Massa, C., Le Milbeau, C., Richard, H., 2015. Evolution of pastoralism in Southern Greenland during the last two millennia reconstructed from bile acids and coprophilous fungi spores in lacustrine sediments. Organic Geochemistry 81, 40-44.

c) Le cannabinol, marqueur du rouissage du chanvre

La détection du cannabinol dans les sédiments du lac d'Aydat a ouvert de nouvelles perspectives dans l'utilisation des biomarqueurs moléculaires[13]. En effet, la présence de cette molécule dans les sédiments ne témoigne pas de la simple présence/culture du chanvre dans un bassin versant, mais du processus de rouissage qui vise à rendre plus faciles à travailler les fibres de cette plante. Alors que *Canabis sativa* est attesté dans le bassin versant depuis l'an 600, la présence de cannabinol dans les sédiments entre 1200 et 1850 témoigne de ce processus de rouissage, c'est-à-dire que les fibres de chanvre ont été baignées dans les eaux du lac pour les attendrir (Figure 10). En 1850 le coton remplace le chanvre.

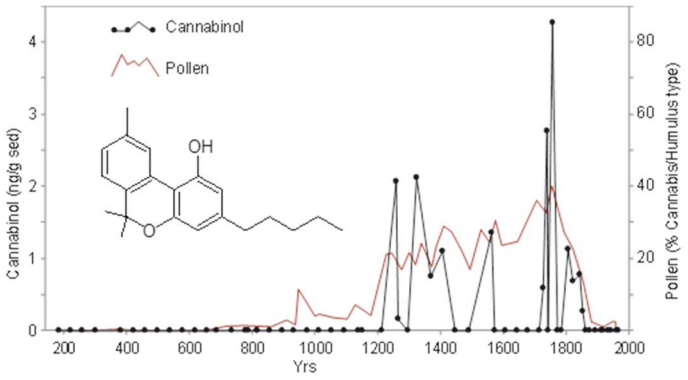


Figure 10 : Evolution des pollen de *C. sativa* et du cannabinol dans les sédiments du lac d'Aydat.

3. Développement d'un nouveau proxy des variations hydrologiques

Durant mon stage postdoctoral au LSCE j'ai reconstitué les variations de température de surface de l'Océan Atlantique au nord de l'Islande sur les deux derniers millénaires au moyen d'un paléothermomètre robuste : les proportions en alcénones sédimentaires[14]. Ce type de proxy[15] est essentiel aux paléoclimatologues car il permet d'accéder à des variables du climat directement intégrables dans les modèles numériques. Fort d'une expérience dans le laboratoire de Yongsong Huang (Brown University, RI, USA) sur une technique émergeante autorisant la mesure de la composition isotopique en hydrogène (δ^2H) de molécules individuelles extraites d'archives sédimentaires que j'ai appliquée pour estimer l'évolution des conditions hydrologiques au NE du Brésil depuis 20000 ans[16], j'ai développé cette technologie à l'ISTO dès 2010 dans le but de développer un outil puissant de reconstitutions paléohydrologiques.

Le fondement de ce proxy réside dans le fait que le δ^2H de molécules fossiles (biomarqueurs moléculaires) extraits d'archives sédimentaires lacustres dépend des conditions hydrologiques qui prévalaient lorsque l'organisme qui a synthétisé ces molécules s'est développé. Dans le cadre de différents chantiers (*cf. infra*), j'ai appliqué ce principe à divers enregistrements en réalisant les mesures sur des molécules peu spécifiques de type n-alcanes ou acides gras, comme le font la plupart des laboratoires de géochimie organique. En revanche, j'ai voulu exploiter la spécificité de la miliacine (un seul producteur connu dans le cadre du lac du Bourget) pour tenter d'affiner les relations mathématiques établies par calibration entre le δ^2H de la miliacine et les paramètres environnementaux (humidité relative, évapotranspiration, quantité d'eau disponible pour les plantes). Le caractère très ciblé de l'étude permettait de prendre en compte un maximum d'éléments qui entrent en jeu dans le développement d'un nouveau proxy : calibration en cultures mais aussi vérification de la pertinence et de la persistance (diagenèse) du signal, puis application à une série sédimentaire. C'est sur cette base qu'a été proposé le projet ANR JCJC **PalHydroMil**.

[13] Lavrieux, M., **Jacob, J.**, Disnar, J.R., Bréheret, J.G., LeMilbeau, C., Miras, Y., Andrieu-Ponel, V., 2013. Sedimentary cannabinol tracks the history of hemp retting. Geology 41, 751-754.
[14] Sicre, M.A., **Jacob, J.**, Ezat, U., Rousse, S., Kissel, C., Pascal Yiou, P., Eiríksson, J., Knudsen, K.L., Jansen, E. et Turon, J.L., 2008. Decadal variability of sea surface temperatures off North Iceland over the last 2000 yrs. EPSL 268, 137-142.
[15] Indice d'approximation d'une variable environnementale
[16] **Jacob, J.**, Huang, Y., Disnar, J.R., Sifeddine, Boussafir, M., A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2007. Paleohydrological changes during the last deglaciation in Northern Brazil. Quaternary Science Reviews 26, 1004-1015.

a) Facteurs affectant le δ^2H de la miliacine

La quantification du fractionnement isotopique entre l'eau de culture et la miliacine a été réalisée par la culture de plants de millet sur solution hydroponique dans des chambres climatiques à Bioemco (coll. Thierry Bariac, Bioemco), lors de la thèse de N. Bossard. Ensuite, nous avons estimé l'impact de divers paramètres environnementaux (humidité relative, stress hydrique aux racines…) sur les fractionnements isotopiques net et apparent. Ces expériences ont fourni des enseignements sur les fractionnements isotopiques respectifs entre triterpènes pentacycliques et n-alkyle lipides[17].

b) Origine de l'oxygène de la miliacine

J'ai profité de ces expériences pour démontrer expérimentalement l'origine de l'oxygène de la miliacine (et par extension des triterpènes oxygénés en C3) dans le cadre d'une collaboration avec Michael Zech (Univ. Bayreuth). Le $\delta^{18}O$ de miliacines produites avec des sources d'oxygène (eau et CO_2) aux compositions isotopiques contrastées sont pourtant similaires, ce qui indique que ni l'eau ni le CO_2 ne sont la source de l'oxygène de la miliacine (Figure 11). Il provient donc de l'O_2 respiré[18], en accord avec la littérature, mais démontré pour la première fois expérimentalement.

Ce résultat implique que la composition isotopique de l'O_2 atmosphérique pourrait être reconstituée à partir du $\delta^{18}O$ de triterpènes sédimentaires, par exemple pour évaluer l'effet Dole[19].

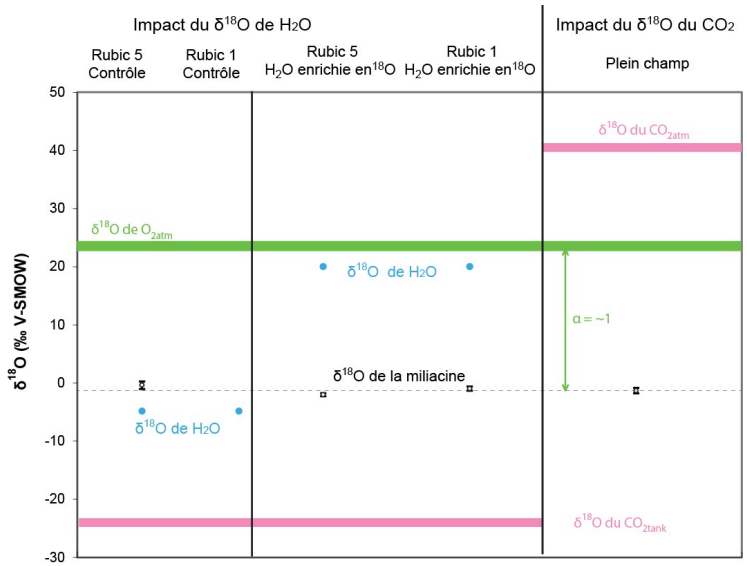


Figure 11 : Valeurs de $\delta^{18}O$ de la miliacine extraite de plants de millets cultivés avec des valeurs de $\delta^{18}O$ de l'eau et du CO_2 atmosphérique différentes.

Dans le cadre du projet D^{18}OLE (Intervie/CNRS, 2017), nous avons (1) tenté de développer la mesure du $\delta^{18}O$ moléculaire par GC-irMS; (2) déterminé le $\delta^{18}O$ d'une vingtaine de composés organiques par EA-irMS; (3) cultivé des haricots en conditions contrôlées pour déterminer le fractionnement biosynthétique entre l'O_2 atmosphérique et les triterpènes; (4) tenté une application sur des sédiments de l'Optimum Thermique à la limite Paléocène/Eocène et à la transition Eocène/Oligocène. La difficulté d'obtenir des mesures $\delta^{18}O$ fiables sur les composés d'intérêt a eu raison de ma motivation pour ce projet.

c) Hétérogénéité de distribution du deutérium au sein des molécules

[17] Bossard, N., **Jacob, J**., Bariac, T., Biron, P., Richard, P., Le Milbeau, C., Terwilliger, V., Vergès, E. Fractionation of hydrogen isotopes during lipid synthesis by Panicum miliaceum. Greenhouse experiments. En préparation pour Geochimica et Cosmochimica Acta.

[18] **Jacob, J.,** Zech, M., Bossard, N., Bariac, T., Gashgaie, J., Terwilliger, V., LeMilbeau, C., Biron, P., Richard, P., Vergès, E. Isotopic evidence for the origin of oxygen in miliacin. En preparation pour RCMS.

[19] Dole, M., 1935. The relative atomic weight of oxygen in water and in air. Journal of the American Chemical Society, 57, 2731.

Le projet PalHydroMil a également permis de purifier 6 g de miliacine à partir d'huile de millet. Les compositions isotopiques ($\delta^{18}O$= -1 ‰, $\delta^{2}H$=-101 ‰, $\delta^{13}C$= -24 ‰ et ^{14}C - moderne) de cette miliacine ont été déterminées par GC-irMS, par EA-irMS, et au LMC14 Artémis afin de la proposer comme standard isotopique. J'ai tiré bénéfice de cette miliacine pour étudier les hétérogénéités de distribution du deutérium au sein de la molécule. La collaboration avec Philippe Lesot (ICMMO, Orsay) nous a permis de mesurer les teneurs en deutérium de chaque groupement méthyle de la miliacine par RMN 2D en abondance naturelles de deutérium[20]. La distribution des teneurs relatives en deutérium au sein de la miliacine est cohérente avec les mécanismes de biosynthèse des triterpènes pentacycliques. Nous rencontrons quelques problèmes de mesure du $\delta^{2}H$ du germanicol alors que cette valeur, comparée à celle de la miliacine, nous permettrait d'obtenir des teneurs absolues en deutérium des groupements méthyle.

d) Pertinence du $\delta^{2}H$ de la miliacine

La distribution des valeurs de $\delta^{2}H$ de la miliacine extraite de plants de millet, à l'échelle d'un champ suit une loi normale centrée sur -121 ‰, avec une dispersion maximale de 50 ‰ ce qui

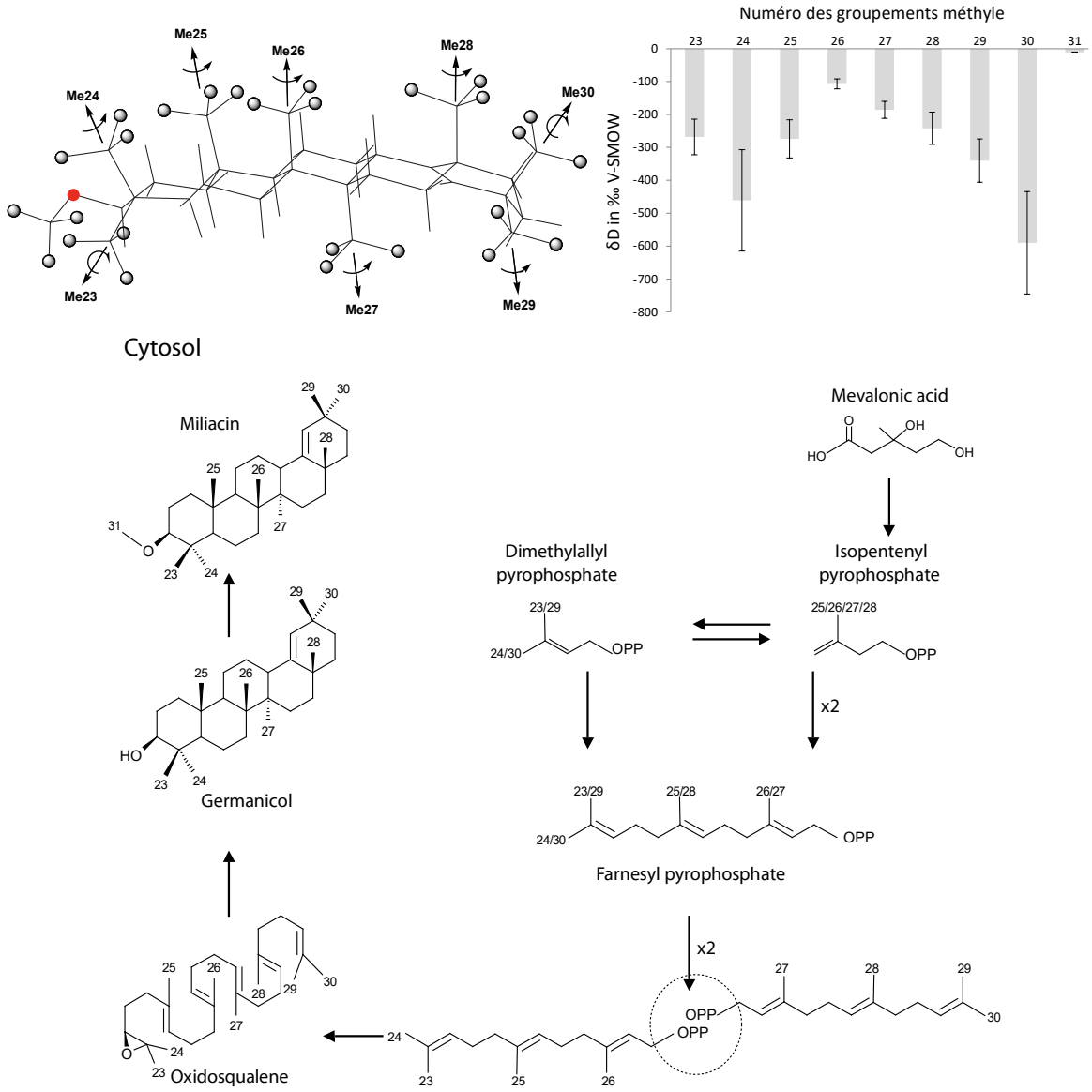


Figure 12 : Valeurs de $\delta^{2}H$ des différents groupements méthyle de la miliacine et liens avec la biosynthèse de la miliacine.

[20] Berdagué, P., Lesot, P., **Jacob, J.**, Terwilliger, V.J., Le Milbeau, C., 2016. Contribution of NAD 2D-NMR in liquid crystals to the determination of hydrogen isotope profile of methyl groups in miliacin. Geochimica et Cosmochimica Acta 173, 337–351.

indique qu'un seul facteur majeur contrôle le δ^2H de la miliacine[21]. La valeur moyenne de δ^2H de la miliacine des sols en avril 2011 (-136 ‰) est significativement différente de celle des plantes (M. Béchard, 2011). Nous avons rejeté l'hypothèse selon laquelle cette différence de δ^2H de la miliacine serait due à la dégradation, considérant que la miliacine est une molécule relativement stable vis-à-vis de la dégradation bactérienne (cf. infra). Les valeurs de δ^2H de miliacines de graines produites sur les quelques dernières années dans la région indique que les valeurs de δ^2H de la miliacine produite en septembre 2010 (-132 ‰) sont en accord avec les valeurs mesurées dans le sol en avril 2011. Ainsi la miliacine du sol conserve-t-elle les valeurs de δ^2H de la miliacine provenant du millet cultivé l'année précédente.

La comparaison du δ^2H miliacine sur ces quelques années avec le δ^2H des eaux de pluie obtenu par le BRGM dans la région souligne par ailleurs que le δ^2H miliacine enregistre fidèlement le δ^2H des précipitations moyennes annuelles, largement conditionné par le δ^2H des précipitations hivernales, les plus abondantes. Cette comparaison entre δ^2H miliacine et δ^2H des précipitations nous a permis de pallier partiellement l'abandon du travail d'intercalibration initialement envisagé dans le projet.

La relation entre δ^2H miliacine et δ^2H des précipitations moyennes annuelles est expliquée par la distribution de la composition isotopique de l'eau du sol de Mézières-lez-Cléry. En effet, bien que la période d'acquisition du δ^2H de la miliacine soit en septembre, lors de la formation des graines, le millet puise en profondeur (>30cm) une eau non affectée par les phénomènes d'évaporation et isotopiquement proche des précipitations hivernales.

e) Impacts de la diagenèse sur le δ^2H de la miliacine

Le standard de miliacine a été également utilisé pour évaluer l'impact de différents types de dégradations sur le δ^2H originel. Nous avons voulu déterminer si (1) *C. olivaceum* était capable de produire de la miliacine comme le rapportent Smetanina et al. [22] ; (2) *C. olivaceum* était capable de se développer sur un substrat comportant de la miliacine – réputé, à l'instar des autres triterpènes pentacycliques comme anti-bactérien et anti-fongique… ; (3) Si *C. olivaceum* pouvait dégrader la miliacine. Dans ce cas, nous aurions mesuré l'impact de cette dégradation sur le δ^2H de la miliacine en mesurant le δ^2H de ses éventuels produits de dégradation. J. Sauze (2012) a démontré durant son stage que *C. olivaceum* ne peut se développer sur un substrat contenant de la miliacine et qu'il n'a pas donc pu la dégrader. Considérant le rôle antibactérien des triterpènes pentacycliques et ces résultats, nous n'avons pas poursuivi les expériences de biodégradation/biotransformation de la miliacine.

L'appauvrissement en D des dérivées de triterpènes pentacycliques par rapport à leurs précurseurs dans des fumiers archéologiques du site de Chatillon-Chindrieux (Lac du Bourget, Age du Bronze) suggère qu'un fractionnement isotopique opère durant la diagenèse des triterpènes pentacycliques[23]. Outre la dégradation biologique, les triterpènes pentacycliques peuvent être dégradés par photochimie. L'exposition de la miliacine et d'autres triterpènes pentacycliques à des rayonnements UV pour provoquer des réactions de photodégradation (stage C. Py-Circan, 2012) a montré que (1) la miliacine, à l'instar des autres triterpènes pentacycliques testés, est difficilement dégradable dans nos conditions opératoires. Elle est, dans tous les cas, moins photodégradable que les cétones triterpéniques telles que friédéline, β-amyrénone ou lupénone. (2) Pour les triterpènes dont nous avons réussi la photodégradation, la photodégradation ne semble pas avoir eu d'impact sur le δ^2H des molécules initiales. Il n'y a donc pas de "tri isotopique" des composés préférentiellement dégradés. (3) le δ^2H des produits de dégradation (résultant pour la plupart de l'ouverture du cycle A) ne présente pas de différence majeure avec le δ^2H des composés originaux.

[21] Bossard, N., **Jacob, J.**, Le Milbeau, C., Lallier-Vergès, E., Terwilliger, V.J., Boscardin, R., 2011. Variation in δD values of a single, species-specific molecular biomarker: a study of miliacin throughout a field of broomcorn millet (Panicum miliaceum L.). Rapid Communications in Mass Spectrometry 25, 1-9.

[22] Smetanina, O.F., Kuznetzova, T.A., Denisenko, V.A., Pivkin, M.V., Khudyakova, Y.V., Gerasimenko, A.V., Popov, D.Y., Il'in, S.G., Elyakov, G.B., 2001. 3b-Methoxyolean-18-ene (miliacin) from the marine fungus Chaetomium olivaceum. Russian Chemical Bulletin 50, 2463–2465.

[23] **Jacob, J**., Le Milbeau, C., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2011. Combined $\delta^{13}C$ - δ^2H analysis of pentacyclic triterpenes and their derivatives. IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland

Il n'y a donc pas, dans nos conditions opératoires, d'échanges significatifs d'hydrogène pouvant expliquer l'appauvrissement en D que nous avons noté dans les fumiers archéologiques.

Nous avons entamé avec V. Terwilliger une expérience d'échange isotopique de l'hydrogène entre de l'eau (enrichie en D) et la miliacine en présence d'argiles (pendant 4 mois à 80 °C). Pour des raisons qui restent à déterminer, le δ^2H de la miliacine est difficile à mesurer. Nous obtenons des valeurs très positives de δ^2H à la fois pour la miliacine et pour les standards que nous co-injectons ce qui suggère un défaut dans le mode opératoire.

M. Lavrieux a tenté de transformer la miliacine et d'autres triterpènes pentacycliques en présence d'acides et de deutérium afin de déterminer les fractionnements et échanges d'hydrogène associés à ces transformations. La miliacine n'a quasiment pas subi de transformation au contraire d'autres composés (crusgalline, arundoïne, cylindrine, acétates de β-amyrine, de taraxérol…) dont les doubles liaisons ou les groupements méthyle ont migré. Les résultats de chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse suggèrent un enrichissement en D durant ces transformations. Considérant les enrichissements associés, nous n'avons pas voulu analyser ces produits par GC-irMS pour ne pas la contaminer.

III. Interactions hommes/milieux/climats durant l'Holocène

1. Culture du millet et évolution climatique dans les Alpes

J'ai consacré une grande partie de mes activités à l'amélioration de la résolution de la courbe des variations de concentration en miliacine et en triméthyletétrahydrochrysène (TTHC) dans les carottes LDB04 et LDB01 du lac du Bourget, sur la période couvrant l'Age du Bronze. Nous avons en effet démontré que l'arrivée de la culture du millet dans le bassin versant du lac du Bourget s'était accompagnée d'une plus forte érosion des sols (marquée par l'augmentation de TTHC) et que cette culture avait été quasi-abandonnée lors de la péjoration climatique survenue à la transition âge du Bronze-âge du Fer[5]. Ces résultats s'inscrivent dans un scenario global d'évolution des Alpes sous la double contrainte des changements climatiques et des activités anthropiques durant l'Holocène[24].

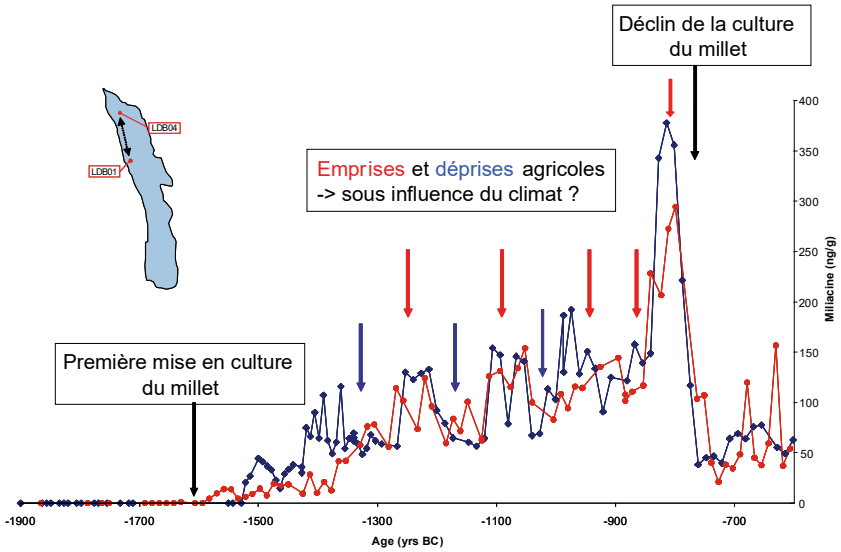


Figure 13 : Evolutions des teneurs en miliacine dans les carottes LDB01 et LDB04 du Lac du Bourget durant l'âge du Bronze.

Les résultats de ces analyses sont illustrés en Figure 13 pour l'âge du Bronze. Ils montrent une excellente corrélation entre les deux enregistrements, ce qui laisse à penser que la distribution de la miliacine dans les sédiments est relativement homogène et que les variations enregistrées sont significatives. Les teneurs en miliacine montrent des fluctuations sur la période considérée qui ne peuvent être attribuées ni aux taux de sédimentation ou à une dilution par la fraction minérale, ni à la dégradation de la miliacine ou à des changements dans les modalités de transport de cette molécule. Les variations d'abondance en miliacine durant l'Age du Bronze montrent en revanche des corrélations surprenantes avec des indices d'occupation humaine (densité des dates dendrochronologiques mesurées sur pieux, surface des habitats par période d'occupation) et les variations d'ordre climatique (niveaux lacustres ou températures de surface de l'océan Atlantique[14]). L'hypothèse actuelle, qui demande confirmation, est que ces variations traduisent des changements de biomasse de millet produite dans le bassin versant, soit des phases d'emprise et de déprise agricole. Nous disposons d'évidences archéologiques pour proposer que ces emprises et déprises sont liées à des variations démographiques. Considérant le rythme de ces variations, très proches de variabilités climatiques décrites par ailleurs, un lien causal entre variations climatiques et démographie pourrait être proposé. Ces résultats ont fait l'objet de plusieurs communications à congrès[25,26,27,28] et ont finalement été publiés dans la review sur les marqueurs sédimentaires de

[24] Arnaud, F., Révillon, S., Debret, M., Revel, Chapron, E., M., **Jacob, J**., Giguet-Covex, C., Poulenard, J., Magny, M., 2012. Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology. Quaternary Science Reviews 51, 81-92.
[25] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A. Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? IMOG 2009, Brême, 9-12 septembre 2009.

l'anthropisation avec N. Dubois[29]. Le point bloquant pour une autre publication est le manque d'enregistrements climatiques de qualité et de résolution équivalente dans la région, qui limite les interprétations possibles. La reconstruction des variations hydrologiques durant l'âge du Bronze à partir du δ^2H de la miliacine (*cf. infra*) aurait dû nous permettre de comprendre si un contrôle climatique peut être invoqué pour expliquer ces phases.

L'objectif principal du projet **PalHydroMil** était d'estimer l'évolution des conditions hydrologiques qui régnaient pendant l'âge du Bronze autour du Lac du Bourget, considérant que cette évolution a pu contraindre l'évolution des sociétés humaines à cette période, comme supposé d'après l'évolution des concentrations en miliacine. Les mesures δ^2H sur miliacine des carottes LDB01 et LDB04 devaient être réalisées dans le cadre de la thèse N. Bossard et du projet **PalHydroMil**, et leur interprétation appuyée par la calibration. Néanmoins, les teneurs trop faibles en miliacine n'ont permis la mesure que sur quelques échantillons. J'ai décidé de reconstituer les variations hydrologiques à partir du δ^2H des acides gras préservés dans les deux carottes. Ici également, les faibles teneurs dans certains échantillons ont limité le nombre de données exploitables. La question d'un contrôle climatique sur la démographie et l'agriculture autour du Lac du Bourget durant l'âge du Bronze reste donc à démontrer.

Nous avons tout de même pu réaliser une vingtaine de mesures δ^2H sur la miliacine (bien plus concentrée) extraite des niveaux archéologiques du site de Chatillon, correspondant à la fin de l'âge du Bronze. Sur la période -900/-800 BC (i.e. juste avant la péjoration climatique de la transition âge du Bronze/âge du Fer), les valeurs δ^2H miliacine sont comprises entre -142 et -111‰, avec une légère tendance à la décroissance qui pourrait traduire des conditions de plus en plus humides durant cette période. Ces résultats ont fait l'objet de deux communications à congrès[30,31]. A noter que les valeurs δ^2H miliacine sont très similaires entre les échantillons des fumiers archéologiques de Chatillon et les échantillons du même âge prélevés sur les carottes LDB04 LDB01 pour lesquels nous avons réussi à obtenir des valeurs.

2. Variabilité climatique et usage des sols en Auvergne

La carotte sédimentaire de 20m couvrant les 8000 dernières années, étudiée dans le projet ERODE et dans le cadre de la thèse de M. Lavrieux, a délivré des informations précieuses sur les rôles respectifs des changements climatiques et de l'usage des sols sur le détritisme, avec un impact plus prégnant des activités humaines à partir de 1100 cal. BP[32]. Les teneurs en cannabinol dans le sédiment ont permis de reconstituer l'histoire du rouissage du chanvre avec des premiers indices vers 1200 puis un abandon de cette pratique en 1850, dates en accord avec les données documentaires[13]. L'évolution récente des concentrations en acétates de triterpényles dans les sédiments, couplée à une étude bibliographique, ont permis à M. Lavrieux d'établir une chronologie du développement des astéracées dans la région, appuyée ici encore par des données textuelles. Malgré ces résultats, je considère que cette série sédimentaire de référence est sous-exploitée et envisage toujours des moyens de valorisation. Le stage de M1 de C. Pareux, focalisé sur le Néolithique, n'a permis que des avancées très légères sur le sujet.

---

[26] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A., Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? Atelier Climat et Impacts, Orsay, 5-6 novembre 2009.

[27] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A., Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? EGU, Vienne, avril 2009.

[28] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., Chapron, E., 2009. Evolution haute résolution de la culture du millet et de l'érosion des sols durant l'âge du Bronze dans les sédiments du Lac du Bourget (Savoie). Séminaire "Matières Organiques et Environnement", Sainte Maxime, 25-29 Janvier 2009.

[29] Dubois, N., **Jacob, J.**, 2016. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives: A review. Frontiers in Ecology and Evolution 4:92, doi: 10.3389/fevo.2016.00092.

[30] **Jacob, J**., Bossard, N., LeMilbeau, C., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., 2011. High resolution record of hydrological conditions during the Late Bronze Age around Lake le Bourget from the δD of a millet-specific molecular biomarker. XVIIIth INQUA Meeting, Bern, July 2011.

[31] **Jacob, J**., Bossard, N., LeMilbeau, C., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., 2010. Evolution of hydrological conditions during the Final Bronze Age. Insights from the δD of specific molecular biomarkers preserved in archaeological layers in Lake le Bourget. 6ème Congrès de la Société Française des Isotopes Stables, 26-29 octobre 2010, Toulouse, France.

[32] Lavrieux, M., Disnar, J.R., Chapron, E., Bréheret, J.G., **Jacob, J**., Miras, Y., Reyss, J.L., Arnaud, F. 6,700-year sedimentary record of climatic and anthropic signals in Lake Aydat (French Massif Central). The Holocene 23, 1317-1328.

3. Evolution environnementale du Nord-Est du Brésil

La collaboration sur la variabilité climatique et les conséquences sur l'environnement au nord-est du Brésil depuis le Dernier Maximum Glaciaire à partir d'archives sédimentaires lacustres, engagée entre l'IRD (Unité PaléoTropique, Bondy) et l'ISTO depuis ma thèse et le postdoc à Brown University chez Yongsong Huang[33], s'est poursuivie avec la thèse de R. Zocatelli, soutenue en avril 2009. Je suis intervenu dans son encadrement sur ce qui concernait les biomarqueurs moléculaires. L'analyse des pigments et des dérivés de la lignine dans les sédiments du lac Caçó[34] a confirmé l'évolution environnementale que nous avions reconstruite à partir de données Rock Eval et de palynofaciès[35]. En parallèle, nous avons valorisé les travaux de calibration des paramètres utilisés dans les reconstructions paléoenvironnementales par l'étude des matières organiques récentes sédimentant dans le lac[36]. Les dépôts de la plaine d'inondation de l'Amazonie ("varzeas") couvrant 5700 ans nous ont permis de reconstituer la dynamique de ces écosystèmes particuliers à travers non seulement la dynamique du fleuve mais également de la végétation qui en peuple les rives[37]. Plus à l'est, l'évolution des matières organiques sédimentaires déposées depuis 2000 ans dans le Lac Boqueirão renseigne, entre autres, sur les variations du niveau lacustre qui ont été comparées aux variabilités de type ENSO[38]. Sur une période plus récente, les biomarqueurs moléculaires spécifiques de graminées[7] préservés dans ces sédiments permettent de retracer l'impact de l'installation d'une société de production de gazon à proximité du lac sur l'usage des sols et sur les écosystèmes.

4. Domestication/diffusion du millet

Le millet *P. miliaceum* est une céréale singulière car elle ne fait pas partie des céréales domestiquées dans le croissant fertile (le "Near East Package"). Sa domestication aurait été plus ancienne, mais une inconnue subsiste sur la zone de domestication ; Chine ou Asie Centrale, et par conséquence sur les voies de diffusion vers l'Europe et en Europe. Je collabore avec l'équipe de M. Jones (Laboratoire d'Archéogénétique, Université de Cambridge) pour participer à différents projets ayant pour but de préciser la dynamique de diffusion de la culture du millet depuis son foyer de domestication vers l'Europe, par la détection de la miliacine dans des sédiments lacustres, des niveaux archéologiques, ou des paléosols. L'article publié avec G. Motuzaite-Matuzeviciute s'inscrit dans ce cadre (cf. infra). A noter les résultats acquis au laboratoire par A. Simonneau[39] qui apportent, à travers la détection de la miliacine dans les sédiments du Lac Paladru et du Lac Lledro des informations essentielles sur la diffusion du millet en Europe. Nous avons poursuivi cette étude par la mesure des concentrations en miliacine dans les sédiments des lacs de La Thuile (Thèse Manon Bajard, EDYTEM) et d'Aiguebelette (stage M1 de F. Renaud).

[33] **Jacob, J**., Huang, Y., Disnar, J.R., Sifeddine, Boussafir, M., A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2007. Paleohydrological changes during the last deglaciation in Northern Brazil. Quaternary Science Reviews 26, 1004-1015.

[34] Zocatelli, R., Bernardes, M., Turcq, B., Campello Cordeiro, R., Albuquerque, A.L., Sifeddine, A., **Jacob, J.**, Boussafir, M., 2012. Composição da matéria orgânica lacustre como ferramenta na reconstrução paleoambiental na Lagoa do Caçó, Maranhão, Brasil. Geochimica Brasiliensis, Ouro Preto, 26, 67-78.

[35] **Jacob, J**., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2004. Major environmental changes recorded by lacustrine sedimentary organic matter since the Last Glacial Maximum under the tropics (Lagoa do Caçó, NE Brazil). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 205, 183-197.

[36] Boussafir, M., Sifeddine, A., **Jacob, J.,** Foudi, M., Cordeiro, R.C., Albuquerque, A.L.S., Abrão, J., Turcq, B., 2012. Petrographical and geochemical study of modern lacustrine sedimentary organic matter (Lagoa do Caçò, Maranão, Brazil): Relationship between early diagenesis, organic sedimentation and lacustrine filling. Organic Geochemistry 47, 88-98.

[37] Zocatelli, R., Moreira-Turcq, P., **Jacob, J**., Cordeiro, R.C., Boussafir, M., Le Millbeau, C., Bernardes, M., Turcq, B. Holocene land covers in Curuai Floodplain inferred from lacustrine biomarkers. En preparation pour Organic Geochemistry.

[38] Zocatelli, R., Turcq, B., Boussafir, M., Cordeiro, R.C., Disnar, J.R., Lima da Costa, R.L., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Bernardes, M.C., **Jacob, J.**, 2012. Late Holocene paleoenvironmental changes in Northeast Brazil recorded by organic matter in lacustrine sediments of Lake Boqueirão. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 363-364, 127-134.

[39] Simonneau, A., Doyen, E., Chapron, E., Millet, L., Di Giovanni, C., Bossard, N., Arnaud, F., Albéric, P., Desmet, M., Roux, G., Lajeunesses, P., Vannière, B., 2013. Holocene human landuse and soil erosion in the French Prealps inferred from organic and mineral analyses on lacustrine sediments (Lake Paladru, France). Journal of Archaeological Science 40, 1636-1645.

IV. Impacts des crises climatiques du Méso-Cénozoïque sur les écosystèmes continentaux

1. Impacts du PETM sur les environnements continentaux

En collaboration avec F. Baudin et J. Schnyder (ISTEP) et F. Quesnel (BRGM), et dans la continuité d'un stage de M2 que j'ai coordonné pour l'ISTO, j'ai participé à l'encadrement de la thèse de S. Garel (soutenue en décembre 2013) dont l'objectif était de comprendre l'impact de la crise hyperthermale à la limite Paléocène/Eocène (PETM) sur les écosystèmes continentaux. Outre qu'il s'agit d'un sujet "chaud", j'ai considéré qu'il constituait un terrain de choix pour appliquer les traceurs et proxies que nous développons au laboratoire. Les résultats de S. Garel, valorisés par trois articles, ont permis de démontrer que cette crise s'était accompagnée de changements environnementaux (hydrologiques, sédimentologiques) majeurs dans le bassin de Dieppe-Hampshire[40]. Nous avons ensuite montré que ces changements environnementaux s'étaient traduits par des successions de végétation à haute fréquence[41] et que ces changements de végétation étaient cohérents dans deux enregistrements distants de plusieurs kilomètres[42].

2. Evolution des écosystèmes continentaux à la transition Eocène/Oligocène dans le graben de Rennes

La qualité des résultats acquis dans la thèse de S. Garel, le bon fonctionnement de la collaboration avec le BRGM et l'ISTEP, et la disponibilité d'un forage réalisé dans les sédiments lacustres Eocène et Oligocène du bassin de Rennes par le BRGM (projet CINERGY) nous ont incité à demander un financement d'une bourse de thèse BRGM-région Centre. J. Ghirardi a utilisé les biomarqueurs moléculaires et leur composition isotopique pour reconstituer les changements hydrologiques et floristiques accompagnant la Transition Eocène/Oligocène (TEO), une transition réputé caractérisée par une chute des températures mondiales et la mise en place progressive des calottes polaires. Les résultats indiquent des variations de concentration en biomarqueurs (d'angiospermes, de fougères et de gymnospermes) dont la fréquence est compatible avec celle des cycles astronomiques et une évolution très rapide des conditions d'humidité (attestées par le δ^2H de n-alcanes ou par la longueur moyenne de chaîne des n-alcanes) bien avant la TEO, durant une période considérée jusqu'alors comme le DoubtHouse[43]. Ces résultats sont en attente de publication du modèle d'âge avant soumission.

3. Evolution climatique au Kazakhstan pendant le Lias

Le projet PaleoNitrogen (J. Schnyder, ISTEP ; Projet Mergence UPMC) visait à tester les isotopes de l'azote comme proxy paléohydrologique pour les séries anté-Quaternaire. Ma contribution à ce projet tient surtout à la détermination du δ^2H de *n*-alcanes provenant d'une série sédimentaire continentale liasique du Kazakhstan dont l'étude était réalisée par R. Tramoy dans le cadre de sa thèse. Les résultats d'isotopie moléculaire que nous avons obtenus on mis en évidence la bascule d'un système chaud et fortement évaporatif au Pliensbachien vers un système plus tempéré au Toarcien[44].

---

[40] Garel, S., Schnyder, J., **Jacob, J.**, Roche, E., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Iakovleva, A., Yans, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F. Paleohydrological changes recorded in terrestrial sediments of the Paleocene-Eocene boundary (Normandy, France). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 376, 184-199.

[41] Garel, S., Quesnel, F., **Jacob, J.**, Roche, E., Le Milbeau, C., Dupuis, C., Boussafir, M., Baudin, F., Schnyder, J., 2014. High frequency floral changes at the Paleocene-Eocene Boundary revealed by comparative biomarker and palynological studies. Organic Geochemistry 77, 43-58.

[42] Garel, S., **Jacob, J.**, Quesnel, F., Le Milbeau, C., Dupuis, C., Baudin, F., Schnyder, J. Consistency of vegetation changes revealed by two sedimentary biomarker records from a highly variable depositional environment. A case study from the Paleocene/Eocene boundary in the Cap d'Ailly area (France). En préparation pour Organic Geochemistry.

[43] **Jacob, J**., Huguet, A., Bauer, H., Boulila, S., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Quesnel, F., Dupont-Nivet, G. Major environmental changes preceded the Eocene/Oligocene Transition by 2.3 Myr on land. Nature Communications, in prep.

[44] Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, J., **Jacob, J.**, Sebilo, M., Derenne, S., Philippe, M., Huguet, A., Pons, D., Baudin, F., 2016. The Pliensbachian-Toarcian paleoclimate transition: New insights from organic geochemistry and C, H, N isotopes in a continental section from Central Asia. Palaeo^3 461, 310-327.

V. Pertinence et représentativité des traceurs et proxies moléculaires – la Caverne de Platon

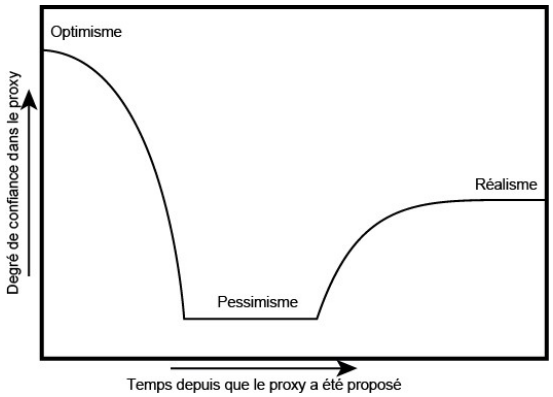


Figure 14 : Les différentes étapes dans le développement d'un proxy et l'évolution du degré de confiance que l'on y accorde. Source : Yvette Eley.

La profusion de nouveaux biomarqueurs moléculaires ayant potentiellement des applications en paléoenvironnements/paléoclimats génère une sainte émulation de la communauté des géochimistes organiciens, dont les réactions suivent de manière systématique le schéma illustré en Figure 13. Qu'il s'agisse des alcénones, des GDGTs ou du δ^2H moléculaire, les premières publications ont généré un enthousiasme débordant et des applications immédiates. Par exemple, après les travaux fondateurs de Sessions[45], de Sauer[46] ou de Huang[47] révélant le potentiel du δ^2H moléculaire, des reconstructions paléoclimatiques ont rapidement été produites grâce à ce nouveau proxy[48]. Aussitôt, la communauté a été critique envers ce nouveau proxy en tentant de comprendre plus finement son fonctionnement et, en conséquence, en identifiant et quantifiant les facteurs de contrôle. Depuis 2012 et l'article de review de Dirk Sachse[49], les publications sur le δ^2H moléculaire se répartissent de manière équitable (93/93) entre études de calibration et applications.

Ces questionnements sur la pertinence, la représentativité ou la fidélité des proxies peut être considérés de manière pessismiste car ils correspondent à une phase durant laquelle le degré de confiance dans le proxy proposé chute drastiquement (Figure 14). Aussi, pour les communautés extérieures ou étrangères à la géochimie organique, ces phases sont souvent le prétexte au discrédit. Pour les alcénones, l'article de Ohkouchi et al. (2002)[50] démontrant que des alcénones pouvaient avoir été advectées sur de longues distances, ne pas être contemporaines du sédiment encaissant, et donc donner des températures de surface de l'océan faussées, a fait l'effet d'une bombe. S'en est suivi une défiance tenace sur les reconstructions de température de l'océan au moyen des alcénones. Eprouvés par de multiples exemples de nouveaux proxies proposés, la communauté des géochimistes organiciens n'est pas naïve mais bien consciente des biais inhérents à chaque nouveaux proxy ou traceur. Aussi, la démarche de questionnement des nouvelles propositions, en parallèle de leur exploitation/application, apparaît-elle très rigoureuse voire exemplaire. Mais ce travail de fond sur la signification et la fidélité des paramètres que les géochimistes organiciens proposent aux autres communautés doit être accompagné d'un travail pédagogique sur la compréhension nécessaire des limitations quand à l'interprétation de ces outils.

[45] Sessions A.L., Burgoyne T.W., Schimmelmann A. and Hayes J.M., 1999. Fractionation of hydrogen isotopes in lipid biosynthesis. Org. Geochem. 30, 1193-1200.
[46] Sauer P.E., Eglinton T.I., Hayes J.M., Schiemmelmann A. and Sessions A.L., 2001. Compound-specific D/H ratios of lipid biomarkers from sediments as a proxy for environmental and climatic conditions. Geochim. Cosmochim. Acta 65, 213-222.
[47] Huang Y., Shuman B., Wang Y. and Webb T., 2002. Hydrogen isotope ratios of palmitic acid in lacustrine sediments record late Quaternary climate variations. Geology 30, 1103-1106.
[48] Schefuss, E., Schouten, S., Schneider, R.R., 2005. Climatic controls on central African hydrology during the past 20,000 years. Nature 437, 1003–1006.
[49] Sachse D., Billault I., Bowen G.J., Chikaraishi Y., Dawson T.E., Feakins S.J., Freeman K.H., Magill C.R., McInerney F.A., van der Meer M.T.J., Polissar P., Robins R., Sachs J.P., Schmidt H.-L., Sessions A.L., White J.W.C., West J.B. and Kahmen A., 2012. Molecular paleohydrology: Interpreting the hydrogen-isotopic composition of lipid biomarkers from photosynthetic organisms. Annu. Rev. Earth Pl. Sci. 40, 221-249.
[50] Ohkouchi N., Eglinton T.I., Keigwin L.D., Hayes J.M., 2002. Spatial and temporal offsets between proxy records in a sediment drift. Science 298, 1224-1227.

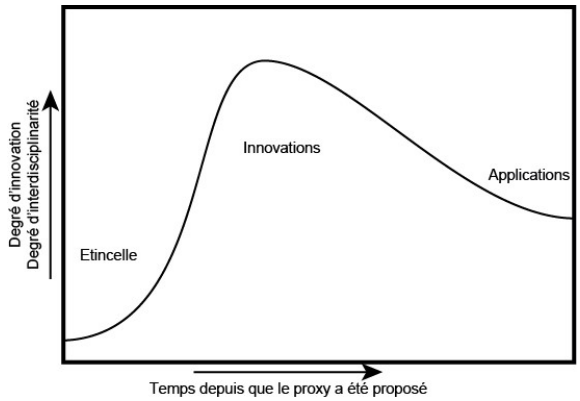


Figure 15 : Les différentes étapes dans le développement d'un proxy et l'évolution du degré de confiance que l'on y accorde. Une vision plus optimiste et personnelle.

En fait, ma perception de l'évolution d'un proxy est radicalement différente de celle proposée par Yvette Eley car celle-ci est, sans doute, très communauté-dépendante. L'optimisme ou le pessisme en fonction du degré de confiance dans le proxy sont ici définis selon les utilisateurs finaux (ou finauds !), c'est-à-dire les paléoenvironnementalistes ou paléoclimatologues. J'ai le souvenir d'une discussion avec J. Hayes à l'occasion de la conférence sur les isotopes de l'hydrogène. Pour lui, il n'était pas nécessaire de trop discuter les "bruits biologiques" pouvant affecter le δ^2H moléculaire. L'important était de fournir aux paléoclimatologues un outil clé en main d'estimation de la paléohydrologie. J'ai exprimé mon désaccord puisque, pour un géochimiste organicien, chaque exemple de questionnement sur un proxy ou traceur a été l'occasion d'innovations majeures liées à un dialogue interdisciplinaire riche. Ainsi, après l'étincelle initiale (Figure 15), les travaux engagés sur le développement des proxies et traceurs sont le prétexte à de nombreuses recherches inetrdisciplinaires et la source d'innovations jusqu'à ce que l'intérêt pour le proxy ou traceur s'épuise (à la faveur d'une nouvelle mode ?) ou que la communauté considère avoir déblayé les enjeux majeurs autour de ce proxy ou traceur et compris l'essentiel des processus qui leur sont liés.

"C'est lorsque nous croyons savoir quelque chose qu'il faut justement réfléchir un peu plus profondément" - Frank Herbert (Les enfants de Dune)

Ainsi, les succès que nous avons eu dans le développement des traceurs et proxies ont également provoqué de nouvelles questions sur les filtres/biais entre l'image que donnent nos marqueurs des environnements passés et la réalité de l'époque :

- Dans quelle mesure un biomarqueur est-il réellement spécifique de sa source ?
- Quels sont les relations quantitatives entre concentration dans le sédiment d'un biomarqueur et biomasse de son organisme source dans le bassin versant ?
- Quels sont les contrôles agissant sur la variabilité spatiale des biomarqueurs ?
- Quelle est la signification temporelle des biomarqueurs moléculaires ?

La première question est récurrente en géochimie organique. Les trois dernières questions sont latentes, émergentes, formulées par Eglinton and Eglinton (2008), et partagées par quelques uns au sein de la communauté (par exemple D. Sachse, E. Schefuss, A. Diefendorf et Y. Eley). Ces nouvelles questions ont trouvé des éléments de réponse dans les différents projets auxquels je me suis consacré (*cf. infra*). Certaines restent, toutefois, en suspens. Elles constituent l'une de mes motivations pour mon nouveau projet de recherche sur les socio-écosystèmes urbains.

1. La miliacine sédimentaire : est-ce vraiment un marqueur du millet cultivé ?

Tout biomarqueur moléculaire est spécifique d'un taxon donné tant que le contraire n'a pas été démontré. Ainsi, notre connaissance de la chemotaxonomie des biomarqueurs est-elle dépendante de l'état des connaissances chez les pythochimistes ou microbiochimistes (voir example sur les acétates de triterpényles plus haut). Un exemple historique en géochimie organique est celui de l'oléanane, réputé marqueur des angiospermes et donc restreint aux roches et huiles post-Crétacé[51] avant que l'oléanane soit également identifiée dans des fossiles de plantes hors angiospermes du Paléozoïque et du Mésozoïque[52]. Cela suppose une divergence très précoce (pendant le Paléozoïque) des angiospermes de leur taxon source. Des débats sont également animés sur les sources d'alcénones (pour l'Actuel : *Emiliania huxleyi et Gephyrocapsa oceanica*; et pour les échantillons plus anciens : les Noëlaerhabdaceae) car différentes sources peuvent induire des réponses de distribution des alcénones aux températures différentes[53].

Concernant la miliacine des sédiments lacustres comme marqueur du millet *Panicum miliaceum*, les mêmes questions se posaient, bien évidemment. D'une part parce que les travaux initiaux sur les PTME dans les sédiments du Lac Caço indiquaient clairement que la miliacine est présente dans de nombreux groupes végétaux, mais qu'elle est essentiellement présente dans les graminées. D'ailleurs, lorsque nous l'avons proposée comme marqueur du millet cultivé, nous avions expliqué la relation intime entre miliacine des sédiments du lac du Bourget / *Panicum miliaceum* par : (1) le fait que peu de graminées produisent la miliacine comme seul PTME et (2) *Panicum miliaceum* est la seule graminée inventoriée par les archéobonatistes travaillant sur l'âge du Bronze susceptible d'avoir produit la miliacine (et seulement la miliacine parmi les PTME) retrouvée dans les sédiments.

D'autre part parce que les travaux de Smetanina et al.[54] indiquaient une source autre que des végétaux vasculaires, à rebours des connaissances sur la distribution des triterpènes pentacycliques oxygénés sur le carbone 3. La proposition qu'une moisissure (*C. olivaceum*) puisse produire de la miliacine était contrariante car elle remettait en cause nos interprétations sur l'évolution de la culture du millet autour du lac du Bourget. Par ailleurs, cette conclusion était reprise sans être critiquée par Volkman en 2005[55]…

Enfin, les travaux de Lu et al. (2009)[56] suggéraient que *Setaria italica*, le millet des oiseaux qui est également décrit par les archéobotanistes sur les sites de laâge du Bronze autour du Lac du Bourget[57], puisse également être une source de miliacine, ce qui rendait caduque la relation unique miliacine/*P. miliaceum*. Sur cet article, je reste très surpris que des chromatogrammes de cette qualité aient pu être publiés dans PNAS…

Dans le cadre de la thèse de N. Bossard et du stage de M2 de J. Sauze, nous avons cultivé *C. olivaceum* dans les mêmes conditions que Smetanina et al.[58]. Nous n'avons pu détecter un seul ng de miliacine[59] alors que Smetanina en avaient obtenu assez pour réaliser de la RMN. La conclusion à laquelle nous sommes parvenus (mais que nous n'avons pas déclaré dans la publication) est que les auteurs avaient sans doute réalisé leurs cultures sur du millet plutôt que sur du riz. L'analyse de

[51] Moldowan, J.M., Dahl, J., Huizinga, B.J., Fago, F.J., Hickey, L.J., Peakman, T.M., Taylor, D.W. 1994. The molecular fossil record of oleanane and its relationship to angiosperms. Science 265, 768-771.
[52] Taylor, D.W., Li, H., Dahl, D., Fago, F.J., Zinniker, D., Moldowan, J.M., 2006. Biogeochemical evidence for the presence of the angiosperm molecular fossil oleanane in Paleozoic and Mesozoic non-angiospermous fossils. Paleobiology 32, 179-190.
[53] Plancq, J., Grossi, V., Henderiks, J., Simon, L. and Mattioli, E., 2012. Alkenone producers during late Oligocene-early Miocene revisited. Paleoceanography 27, PA1202.
[54] Smetanina, O.F., Kuznetzova, T.A., Denisenko, V.A., Pivkin, M.V., Khudyakova, Y.V., Gerasimenko, A.V., Popov, D.Y., Il'in, S.G., Elyakov, G.B., 2001. 3b-Methoxyolean-18-ene (miliacin) from the marine fungus Chaetomium olivaceum. Russian Chemical Bulletin 50, 2463–2465.
[55] Volkman, J.K., 2005. Sterols and other triterpenoids: source specificity and evolution of biosynthetic pathways. Organic Geochemistry 36, 139-159.
[56] Lu, H., Zhang, J., Liu, K.B., Wu, N., Li, Y., Zhou, K., Ye, M., Zhang, T., Zhang, H., Yang, X., Shen, L., Xu, D., Li, Q., 2009. Earliest domestication of common millet (Panicum miliaceum) in East Asia extended to 10,000 years ago. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 106, 7367-7372.
[57] Bouby, L., Billaud, Y., 2001. Economie agraire à la fin de l'âge du Bronze sur les bords du lac du Bourget (Savoie, France). Cr. Acad. Sci. II A 333, 749-756.
[58] Smetanina, O.F., Kuznetzova, T.A., Denisenko, V.A., Pivkin, M.V., Khudyakova, Y.V., Gerasimenko, A.V., Popov, D.Y., Il'in, S.G., Elyakov, G.B., 2001. 3b-Methoxyolean-18-ene (miliacin) from the marine fungus Chaetomium olivaceum. Russian Chemical Bulletin 50, 2463–2465.
[59] Bossard, N., **Jacob, J.**, Le Milbeau, C., Sauze, J., Terwilliger, V., Poissonnier, B., Vergès, E., 2013. Distribution of miliacin (olean-18-en-3β-ol methyl ether) in broomcorn millet (Panicum miliaceum), and other reputed potential sources. Consequences on the use of sedimentary miliacin as a tracer of millet. Organic Geochemistry 63, 48-55.

graines provenant de plusieurs variétés de *P. miliaceum* actuellement cultivé et de graines correspondant à des variétés anciennes (collection de B. Poissonnier, INRAP), de plusieurs variétés de *S. italica* mais aussi d'autres espèces du genre *Panicum* et de plusieurs espèces du genre *Pennisetum* a amené les conclusions suivantes : (1) la miliacine est très abondante dans toutes les variétés de *P. miliaceum*; (2) elle est essentiellement présente dans les graines, très peu dans les feuilles et tiges, absente des racines; (3) la miliacine est également présente dans toutes les espèces de *Panicum*; (4) la miliacine est présente chez certaines *Pennisetum*; (5) la miliacine est absente de *S. italica*.

2. Quelles sont les relations quantitatives entre concentration d'un biomarqueur dans le sédiment et biomasse de son organisme source dans le bassin versant ?

Si les concentrations en biomarqueurs ont été tentativement utilisées pour discuter des variations de productivité en domaine marin avec, par exemple, une comparaison des concentrations en alcénones avec les dénombrements de coccolithophores[60], l'interprétation des concentrations en biomarqueurs dans les sols (voir l'exemple des concentrations en ergostérol dans les sols pour estimer la biomasse fongique)[61] et sédiments continentaux est très peu avancée. Aussi, dans les projets que j'ai portés ou auxquels j'ai été associé, j'ai exploré la signification des concentrations abolues en biomarqueurs dans les sols et sédiments.

a) Peut-on estimer la consommation en millet durant l'âge du Bronze ?

Considérant que les concentrations en miliacine dans les sédiments sont homogènes à l'échelle du lac, j'ai proposé qu'il fût possible d'estimer la quantité globale de miliacine archivée dans les sédiments. En estimant le volume de sédiments profonds et littoraux par sismique, en faisant plusieurs hypothèses sur le transport et la conservation de la miliacine dans les sédiments et en connaissant les teneurs en miliacine dans les graines de millet, nous avons tenté d'estimer les quantités de millet produites au cours de l'âge du Bronze et comparé ces données avec les estimations démographiques réalisées par d'autres biais (Figure 16, coll. Yves Billaud, DRASSM). Les résultats sont d'abord livrés sous forme de tonnage de graines de millet par an, ce qui permet ensuite de proposer une consommation quotidienne de millet. Malgré tous les biais possibles et les hypothèses formulées, les chiffres obtenus sont très cohérents avec estimations journalières fournies par archéologues et diététiciens[62,63].

[60] Malinverno, E., Prahl, F.G., Popp, B.N., Ziveri, P., 2008. Alkenone abundance and its relationship to the coccolithophore assemblage in Gulf of California surface waters. Deep-Sea Research I 55, 1118–1130.
[61] Zhaoa, X.R., Lina, Q., Brookes, P.C., 2005. Does soil ergosterol concentration provide a reliable estimate of soil fungal biomass? Soil Biology & Biochemistry 37, 311–317.
[62] **Jacob, J**., Chapron, E., Billaud, Y., Ledoux, G., Lajeunesse, P., Disnar, J.R., St-Onge, G., LeMilbeau, C., Bossard, N., Arnaud, F., 2011. Towards an estimate of catchment-scale cereal biomass production during the Late Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). XVIIIth INQUA Meeting, Bern, July 2011.
[63] **Jacob, J**., Chapron, E., Billaud, Y., Ledoux, G., Lajeunesse, P., Disnar, J.R., St-Onge, G., LeMilbeau, C., Bossard, N., Arnaud, F., 2011. Can we estimate catchment-scale biomass production from sedimentary biomarkers? An attempt with miliacin in Late Bronze Age levels from Lake le Bourget (French Alps). 25th IMOG, Interlaken, September 2011.

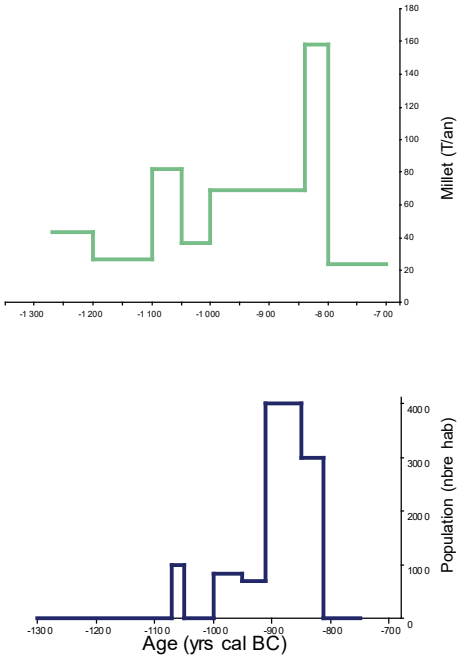


Figure 16 : Evolution du tonnage annuel de millet estimé au moyen des concentrations en miliacine dans les sédiments du lac du Bourget comparée à l'évolution démographique sur les bords du lac par mesure des surfaces habitées par les palaffites au cours du temps (Y. Billaud, DRASSM).

b) Peut-on estimer les paléopopulations de bétail ?

L'évolution similaire en amplitude des concentrations en acide déoxycholique et en spores de champignons coprophiles dans les sédiments du Lac d'Igaliku (Figure 9) suggère que des relations quantitatives puissent être établies entre concentrations d'acide déoxycholique et population d'herbivores dans le bassin versant, bien que cela doive être appuyé par des études de calibration[64]. Dans le cadre du Projet MOLECULE, porté par A. Simonneau, nous avons tenté de préciser ces relations quantitiatives en comparant les concentrations de marqueurs fécaux dans des tourbières des Pyrénnées avec l'évolution du cheptel de moutons et de vaches dans les bassins versants[65].

c) Comparaison pollen/biomarqueurs moléculaires

Si la comparaison des informations fournies par les pollen et les biomarqueurs moléculaires permet d'affiner les reconstructions paléoenvironnementales – et parfois d'identifier les sources des biomarqueurs moléculaires nouveaux -, elle apporte également souvent son lot de frustrations puisque les enregistrements sont en général significativement différents, aussi bien d'un point de vue du timing des évènements que des abondances respectives des taxa caractérisés. Nous avons fait ce constat sur les séries du PETM dans le cadre de la thèse de S. Garel puisque les successions végétales rapides identifiées lors de cette transition sont révélées distinctement par les deux types de traceurs[66], mais aussi dans la série Eocène-Oligocène étudiée dans le cadre de la thèse de J. Ghirardi[67]. Ces questionnements sur les significations respectives des quantités de pollen et biomarqueurs sont largement partagés dans la communauté[68,69,70]. Elles résultent de taphonomies

[64] Guillemot, T., Zocatelli, R., Bichet, V., **Jacob, J.**, Gauthier, E., Massa, C., Le Milbeau, C., Richard, H., 2015. Evolution of pastoralism in Southern Greenland during the last two millennia reconstructed from bile acids and coprophilous fungi spores in lacustrine sediments. Organic Geochemistry 81, 40-44.

[65] Cerubini, R., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Galop, D., **Jacob, J.**, Zocatelli, R., Di Giovanni, C., Mazier, F., 2015. Cortèges moléculaires liés aux activités pastorales: Tentative de calibration quantitative dans les sédiments de la tourbière Orry de Théo (Observatoire Homme Milieu Haut Vicdessos, Pyrénées ariégeoises, France). 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

[66] Garel, S., Quesnel, F., **Jacob, J.**, Roche, E., Le Milbeau, C., Dupuis, C., Boussafir, M., Baudin, F., Schnyder, J., 2014. High frequency floral changes at the Paleocene-Eocene Boundary revealed by comparative biomarker and palynological studies. Organic Geochemistry 77, 43-58.

[67] Ghirardi, J., **Jacob, J.**, Huguet, A., Bauer, H., Le Milbeau, C., Chateauneuf, J.J., Quesnel, F., Di Giovanni, C., 2014. A unique high resolution record of climate and vegetation changes during the EOT. The CDB1 core, Rennes Basin, France. Climate and Biotic Events of the Paleogene. 1-6 Juillet 2014, Ferrara, Italie.

[68] Regnery, J., Püttmann, W., Koutsodendris, A., Mulch, A., Prossad, J., 2013. Comparison of the paleoclimatic significance of higher land plant biomarker concentrations and pollen data: A case study of lake sediments from the Holsteinian interglacial. Organic Geochemistry 61, 73-84.

différentielles entre les deux traceurs : (1) différences entre définition des taxons palynologiques et taxons moléculaires ; (2) différences de quantités de traceurs produites par les taxons ; (3) différents modes de transport ; (4) différents modes de préservation. La représentativité quantitative des biomarqueurs moléculaires dans les archives géologiques questionne ainsi tout autant que celle des pollen[71,72]. Toutefois, la géochimie organique étant une science plus jeune que la palynologie, les questionnements restent émergents.

3. Quels sont les contrôles agissant sur la variabilité spatiale des biomarqueurs ?

Cette question est très liée à la précédente puisqu'il s'agit ici non seulement de comprendre les contrôles agissant sur l'absence/présence de biomarqueurs, mais également de comprendre ceux qui président à la répartition spatiale de leurs concentrations dans les sols et sédiments. De nombreux travaux paléoenvironnementaux portent en effet sur des prélèvements uniques dans l'archive sédimentaire sans porter attention à la diversité des contextes qu'elle enregistre et l'impact potentiel sur la représentativité de l'enregistrement. Un exemple que j'utilise fréquemment en cours est l'article de Schefuß et al. (2005)[73] qui étudient les chagement hydrologiques survenus dans le bassin versant du Congo depuis 20000 ans au moyen du δ^2H de lipides d'une carotte prélevée dans le delta de ce fleuve. Considérant la diversité des contextes drainés, je m'interroge sur la signification du signal obtenu dans les sédiments.

Ici encore, les exemples d'études sur la variabilité spatiale des concentrations en biomarqueurs moléculaires sont peu nombreux. A noter pour les sols, une autre étude mesurant les concentrations en ergostérol[74] qui sont comparées à d'autres facteurs (pH, épaisseur de la couche organique, C, N, K, Mg…) pour déterminer les facteurs de contrôle agissant sur la répartition de la biomasse fongique. Ces travaux font écho aux études en cours en écologie des sols pour comprendre, à très petite échelle, les facteurs contrôlant l'hétérogénéité de distribution des organismes[75], et par extension (ou par extrapolation), la distribution des composés organiques en général et des biomarqueurs en particulier.

En contexte archéologique, nos collègues de l'OGU de Bristol[76] ont produit une étude bluffante sur la répartition de dérivés bromés du bleu indigo ("Royal ou Tyrian Purple") dans une chambre funéraire du site de Qatna (âge du Bronze), en Syrie. La répartition des ces biomarqueurs sur le sol d'occupation permit aux auteurs de discuter le statut royal de certaines sépultures.

Dans les sédiments, les travaux portant sur l'hétérogenéité spatiale des biomarqueurs moléculaires sont sans doute encore plus rares que dans les sols. L'étude de Sarkar et al. (2014)[77] n'en est que plus remarquable. Par l'étude comparée des biomarqueurs moléculaires dans dix sept échantillons de sédiments superficiels et dans les plantes du bassin versant, avec l'appui d'une cartographie de la végétation, les auteurs démontrent que, à de rares exceptions près (ACL des *n*-alcanes plus élevée au centre du lac, rôle des mats microbiens littoraux sur les concentrations en *n*-

[69] Diefendorf, A., Freeman, K.H., Wing, L.S., Graham, H.V., 2011.Production of n-alkyl lipids in living plants and implications for the geologic past. Geochimica et Cosmochimica Acta 75, 7472-7485.
[70] Jansen, B., de Boer, E.J., Cleef, A.M., Hooghiemstra, H., Moscol-Olivera, M., Tonneijck, F.H., Verstraten, J.M., 2013. Reconstruction of late Holocene forest dynamics in northern Ecuador from biomarkers and pollen in soil cores. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 386, 607–619.
[71] Andrieu, V., de Beaulieu, J.-L., Ponel, P., Reille, M., 1997. Les distorsions de l'enregistrement pollinique de l'histoire de la végétation du dernier cycle climatique: exemples de séquences lacustres du Sud de la France. Geobios 21, 195–202.
[72] Goring, S., Lacourse, T., Pellatt, M.G. Mathewes, R.W., 2013. Pollen assemblage richness does not reflect regional plant species richness: a cautionary tale. Journal of Ecology. doi: 10.1111/1365-2745.12135
[73] Schefuß, E., Schouten, S., Schneider, R.R., 2005. Climatic controls on central African hydrology during the last 20,000 years. Nature 437, 1003-1006.
[74] Möttönen, M., Järvinen, E., Hokkanen, T.J., Kuuluvainen, T., Ohtonen, R., 1999. Spatial distribution of soil ergosterol in the organic layer of a mature Scots pine (Pinus sylvestris L.) forest. Soil Biology and Biochemistry 31, 503-516.
[75] Ettema, C.H., Wardle, D.A., 2002. Spatial soil ecology. Tends in Ecology & Evolution 17, 177-183.
[76] James, M.A., Reifarth, N., Mukherjee, A.J., Crump, M.P., Gates, P.J., Sandor, P., Robertson, F., Evershed, R.P., Pfälzner, P 2009. High prestige Royal Purple dyed textiles from the Bronze Age royal tomb at Qatna, Syria. Antiquity 83, 1109-1118.
[77] Sarkar, S., Wilkes, H., Prasad, S., Brauer, A., Riedel, N., Stebich, M., Basavaiah, N., Sachse, D., 2014. Spatial heterogeneity in lipid biomarker distributions in the catchment and sediments of a crater lake in central India. Organic Geochemistry 66, 125-136.

heptadécane, carotenoïdes et diploptène…), les distributions en *n*-alcanes dans les sédiments du lac représentent une "intégrale moyennée" des distributions hétérogènes de ces biomarqueurs dans les sédiments.

Cette compréhension de l'hétérogénéité spatiale de la distribution des organismes et des biomarqueurs sur les surfaces continentales, à toutes les échelles, semble nécessaire pour une meilleure interprétation des biomarqueurs moléculaires sédimentaires. En effet, à l'échelle micrométrique, à l'échelle de l'organisme, à l'échelle des communautés, de l'échantillons, du m², de la parcelle, du bassin versant, ou du paysage, la distribution des biomarqueurs moléculaires est sujette à des contrôles multiples, mais hiérarchisés, qui s'imbriquent, s'ajoutent, se multiplient ou s'annulent pour au final fournir la seule donnée qui soit utile pour les études paléoenvironnementales et paléoclimatiques : la présence et la concentration en un biomarqueur moléculaire dans un échantillon prélevé sur une carotte sédimentaire, prélevée sur quelques centimètres carrés à l'interface eau-sédiment d'un lac. Je reviendrai plus bas sur la "magie" de cette intégration de l'hétérogénéité spatiale du bassin versant dans les archives lacustres.

a) Contrôles biologiques

L'analyse des sols du bassin versant du Lac d'Aydat a démontré que le type de couvert végétal influençait directement la composition en biomarqueurs des sols sous-jacents (sur la base absence/présence, cf. supra). Nous avons reproduit cette étude à une échelle spatiale plus fine dans la tourbière de La Guette, qui bénéficie de l'infrastructure du SNO Tourbière, en analysant les sols sous des couverts arborés variés (pin sylvestre, bouleau, sans arbres). Nos résultats indiquent que les cortèges moléculaires des sols reflètent avec fidélité le couvert végétal et que des relations quantitatives entre degré de couverture arborée et concentrations en biomarqueurs pourraient être établies[78] (Figure 17).

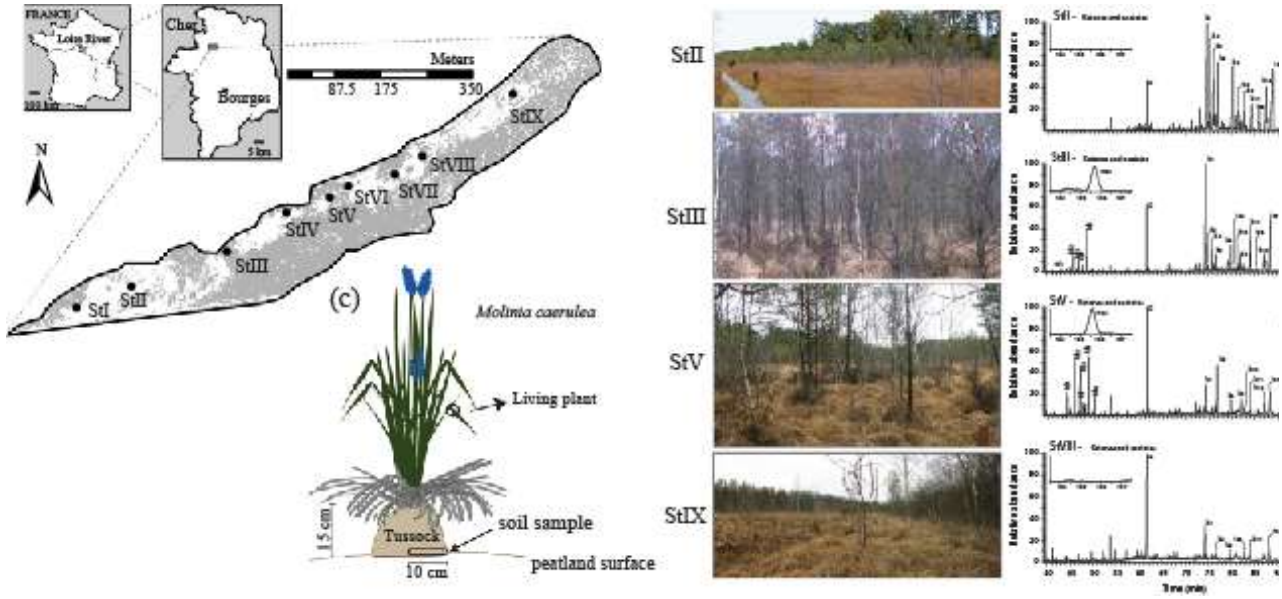


Figure 17 : Distribution des biomarqueurs de la fraction cétones et acétates extraits en base de touradons de molinie dans plusieurs stations de la tourbière de la Guette, sous des couverts végétaux variables.

b) Variabilité spatiale des valeurs de δ^2H moléculaire

L'utilisation de divers marqueurs ou proxies dans les archives sédimentaires lacustres est conditionnée par le postulat que ces proxies enregistrent un état moyen du bassin versant ou du lac à un temps t. Outre des décalages temporels qui peuvent intervenir entre la production de la phase supportant ce proxy et son archivage dans le sédiment, l'hétérogénéité des signatures du bassin versant, les gammes de variations spatiales de ces proxies sont assez peu abordées, au même titre

[78] Zocatelli, R., **Jacob, J.**, Gogo, S., Le Milbeau, C., Rousseau, J., Laggoun-Défarge, F., 2014. Variability of soil lipids reflects vegetation cover in a French peatland. Organic Geochemistry 76, 173-183.

que la variabiliét spatiale des présences ou concentrations en biomarqueurs (cf. supra). Elles sont pourtant nécessaires à l'estimation du degré de confiance que nous pouvons avoir dans ces proxies. Nous avons entrepris avec N. Bossard de mesurer les valeurs de δ^2H de miliacines extraites de graines de millet collectées dans un champ qui montre des contrastes très marqués dans la qualité de son sol.

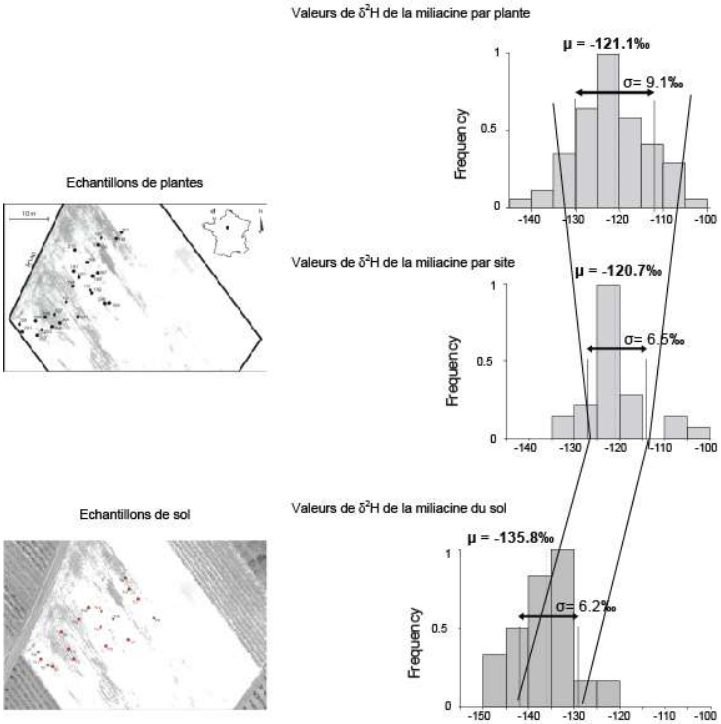


Figure 18 : Distributions des valeurs de δ^2H de la miliacine extraite de graines de millet et de sols sous-jacents dans un champ à Mézières-lez-Cléry. D'après Bossard et al., 2011.

Les écarts de δ^2H miliacine mesurés (plus de 50‰; Figure 18) sont comparables aux écarts relevés pour des *n*-alcanes sédimentaires témoignant d'environnements et de conditions climatiques très distinctes (forêt-savane par exemple). Néanmoins, la distribution gaussienne des valeurs indique qu'un seul facteur est dominant[79]. La dispersion des valeurs est plus réduite dans les sols, ce qui démontre leur rôle d'intégrateur de la variabilité spatial à une échelle intermédiaire. La moyenne des valeurs dans les sols est toutefois distincte de celle des plantes puisque le sol contient de la miliacine produite l'année précédente, avec un δ^2H distinct. Au total, malgré une dispersion des valeurs à l'échelle des organismes, le sol intègre une moyenne qui est cohérente avec les valeurs de δ^2H des précipitations/de l'eau du sol et le fractionnement biosythétique eau-miliacine. Si ce sol était drainé vers un bassin sédimentaire, la valeur de δ^2H de la miliacine serait représentative des conditions climatiques ayant régné l'année de production de cette miliacine. A la difficulté près que ce sol hérite et cumul des miliacines produites les années précédentes.

4. Héritages moléculaires et paléousages

Durant le transfert des biomarqueurs depuis leurs organismes source jusqu'à l'archive sédimentaire, ils peuvent être stockés de manière temporaire dans les sols, les sédiments fluviatiles, voire les sédiments lacustres en cas de remobilisations. Ces stockages temporaires induisent des biais dans la lecture des archives sédimentaires puisque celle-ci se fonde sur l'hypothèse d'un transfert immédiat de la source à l'archive et donc la contemporanéité du biomarqueur avec le sédiment qui l'héberge (cf. infra). A l'inverse, ce stockage temporaire constitue également un héritage moléculaire des sols qui peut renseigner sur leurs anciens couverts végétaux ou leurs

[79] Bossard, N., **Jacob, J.**, Le Milbeau, C., Lallier-Vergès, E., Terwilliger, V.J., Boscardin, R., 2011. Variation in δD values of a single, species-specific molecular biomarker: a study of miliacin throughout a field of broomcorn millet (Panicum miliaceum L.). Rapid Communications in Mass Spectrometry 25, 1-9.

anciens usages. Dans le cadre de plusieurs études, j'ai voulu explorer cet héritage et les informations qui peuvent en être extraites sur la connaisance de l'usage passé des sols.

"La Nature n'oublie pas" – Pape François, 5 janvier 2015.

a) Evidences moléculaires d'un changement récent d'usage des sols

Dans le bassin versant du Lac d'Aydat nous avons pu disposer de sols pour lesquels un changement d'usage prairie -> forêt de conifères est avéré depuis quelques décennies (comparaison de photos aériennes entre 1946 et aujourd'hui). La présence de composés spécifiques de Pinaceae (diterpènes tricycliques et méthoxy-serratènes), qui sont d'ailleurs détectés dans des sols actuels sous forêt de Pinaceae, dans la partie supérieure des sols est en accord avec la culture actuelle de pins sur ces sols (Figure 19). En revanche, les acétates de triterpènyles (marqueurs d'Asteraceae qui sont trouvés dans les sols actuels sous prairie) sont préservés dans les niveaux les plus profonds et attestent de la présence d'une prairie il y a 70 ans, en accord avec les photographies aériennes. Les sols conservent donc une trace moléculaire de leurs anciens usages et des anciennes végétations qui s'y développaient[80].

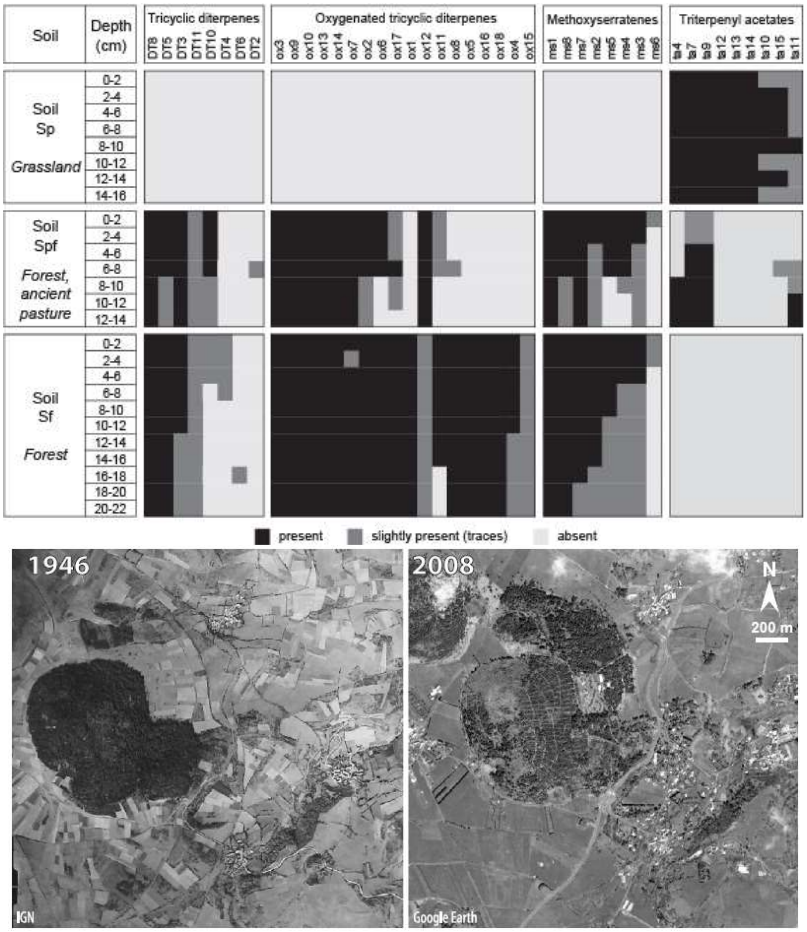


Figure 19 : Evolution de la végétation autour du Puy de la Rodde entre 1946 et 2008. Distribution des marqueurs de Pinaceae et d'Asteraceae dans un sol sous forêt de pins, dans un sol sous prairie, et dans un sol autrefois sous prairie et désormais sous forêt de pins. D'après Lavrieux et al. (2012).

b) Evidences moléculaires d'un ancien sol de culture

Forts de ce constat, nous avons étudié les paléosols associés à des occupations archéologiques datées de l'âge du Fer en Ukraine, dans lesquelles des silos de millet ont été décrits. La question se posait pour les archéologues de la culture du millet sur place par des populations réputées nomades. La présence de miliacine dans les paléosols à proximité des silos a confirmé que

[80] Lavrieux, M., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., **Jacob, J.**, LeMilbeau, C., Zocatelli, R., 2012. Preservation of an ancient grassland biomarker signature in a forest soil from the French Massif Central. Organic Geochemistry 51, 1-10.

la culture du millet était réalisée sur place et que les stocks de millet ne résultaient pas d'échanges avec des populations sédentaires[81].

c) La distribution spatiale de molécules dans les sols peut-elle témoigner des usages passés ?

Les sols conservant une trace chimique de leurs usages anciens, j'ai donc émis l'hypothèse qu'il était possible de reconstituer une image des paléochamps de millet à partir de la distribution spatiale de miliacine, considérée comme le vestige des cultures de l'âge du Bronze, dans les sols actuels autour du Lac du Bourget. Le projet PaléoChamps (AIR Archéométrie) visait donc à tester le potentiel de la géochimie organique pour contribuer aux efforts de l'archéologie spatiale afin de préciser les modalités d'occupation du territoire par les sociétés passées. Le stage de recherche de J. Gérard a démontré la faisabilité d'une telle étude. La miliacine est toujours présente dans les sols alors que les champs de la zone d'étude ne sont plus cultivés pour le millet depuis plusieurs siècles. La distribution spatiale de la miliacine a permis de définir des limites sud et est à la zone de culture du millet en relation avec le site archéologique de Grésine (Figure 20). La distribution verticale de la miliacine dans les sols pose en revanche des questions sur la mobilité de cette molécule, sur ses interactions avec les phases minérales et organiques et sur d'éventuels pools de miliacine d'âges distincts.

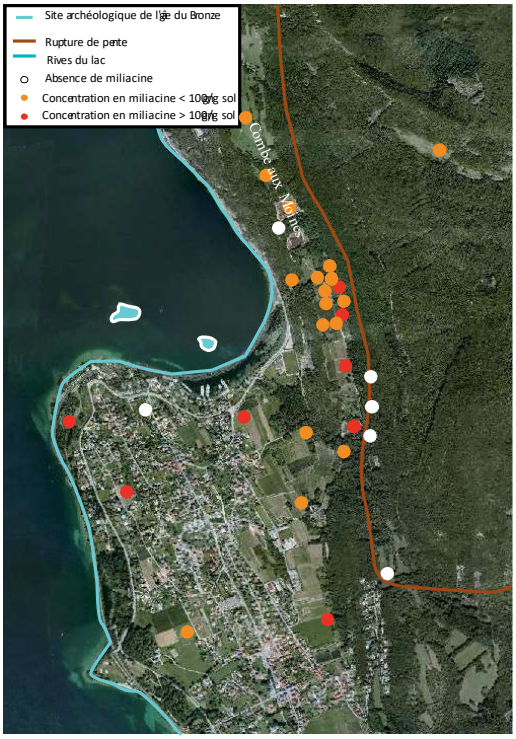


Figure 20 : Distribution de la miliacine dans les sols superficiels à proximité du site archéologique de grésine (âge du Bronze, Lac du Bourget). Travaux J. Gérard.

T. Guillemot a poursuivi ce travail en étudiant à plus haute résolution spatiale la distribution de la miliacine et d'autres triterpènes pentacycliques dans des parcelles de La Combe aux Moines (voir Figure 20). Les teneurs en miliacine se sont avérées trop faibles pour envisager une datation par ^{14}C qui aurait validé son ancienneté. La distribution spatiale de cette molécule n'a pas permis d'obtenir l'empreinte des paléosols/paléoparcelles telle qu'initialement espérée (Figure 21). La comparaison des parcellaires de 1730 (Mappe Sarde), 1881, 1936 et actuel au moyen d'un SIG

[81] Motuzaite-Matuzeviciute, G., **Jacob, J.**, Telizhenko, S., Jones, M.K., 2013. Miliacin in paleosoils from early iron age in Ukraine reveal paleofields of broomcorn millet. Archaeological and Anthropological Sciences, 1-8.

témoigne d'une histoire complexe de ces sols qui a pu flouter la distribution originelle des biomarqueurs qui y étaient préservés[82].

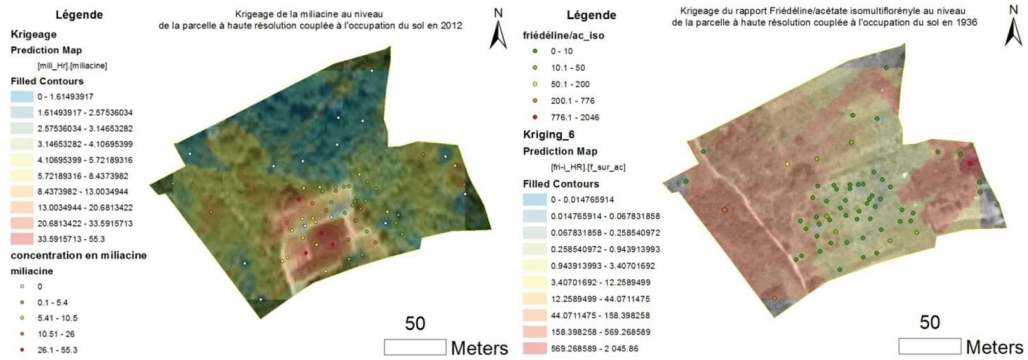


Figure 21 : Distribution des concentrations en miliacine et friédéline dans les sols superficiels d'une parcelle de la Combe aux Moines, sur les bords du Lac du Bourget. Travaux T. Guillemot.

5. Où sont localisés les biomarqueurs moléculaires ?

Les modes d'analyse des biomarqueurs moléculaires (extraction, séparation, analyse par GC-MS…), effacent par essence toute information sur leur localisation dans l'échantillon, et donc sur leurs relations avec les phases minérales et organiques. Visualiser les biomarqueurs au sein des échantillons permettrait d'obtenir des informations sur leur mode/support de transport (phase dissoute, adsorption sur et dans des phases minérales et organiques) et sur les modalités de leur archivage. En s'inspirant des travaux de V. Thiel sur la distribution spatiale de biomarqueurs dans diverses matrices géologiques[83], nous avons entamé une collaboration avec R. Benoit (CRMD, Orléans) dans le cadre de la thèse de J. Ghirardi pour analyser par ToF-SIMS des échantillons laminés des sédiments du Graben de Rennes. Nous avions pour objectif d'expliquer l'origine des lamines sub-millimétriques qui constituent ce sédiment afin de leur attribuer une valeur temporelle en fonction de la répartition verticale nanométrique des biomarqueurs moléculaires. Ces travaux n'ont pas abouti. Pourtant cette question de la localisation de nos biomarqueurs moléculaires à l'échelle micro/nano paraît essentielle pour mieux comprendre la dynamique des biomarqueurs depuis leurs sources jusqu'à l'archive. Cette question transpire également déjà dans les travaux mettant en jeu l'ADN environnemental puisque cette molécule, de réputation fragile, survit dans les sédiments lacustres, ce qui pose des interrogations quant à sa protection/préservation et quant aux techniques d'extraction. Dans le cadre de l'Ecole Chercheur VIZMO de ResMO, nous avons abordé ces difficultés pour non seulement localiser/visualiser les biomarqueurs mais également les interactions qu'ils peuvent réaliser avec leur environnement proche. Ces idées restent en suspens et constituent l'une des motivations de mon second projet de recherche (cf. infra).

6. Homogénéité de l'enregistrement sédimentaire

Considérant les coûts de prélèvement des carottes sédimentaires dans les lacs puis des diverses analyses dont elles font l'objet, il est très rare de multiplier les enregistrements paléoenvironnementaux pour un même site. Pourtant des facteurs hyper-locaux pourraient conduire à des disparités significatives d'enregistrement dans deux archives provenant d'un même lac (cf. supra). On peut dans ce cas légitimement se poser la question de la confiance à accorder à un unique enregistrement paléoenvironnemental établi à partir d'une série sédimentaire lacustre et s'interroger sur sa représentativité de l'évolution des conditions qui ont pu régner dans le bassin versant.

[82] **Jacob, J**., Bossard, N., Poulenard, J., Billaud, Y., Guillemot, T., LeMilbeau, C., Disnar, J.R., Pierre, D., Terwilliger, V.J., Arnaud, F., 2012. Héritage moléculaire des sols actuels: Vers une approche spatialisée des paléochamps de millet autour du Lac du Bourget. Colloque Q8, Clermont-Ferrand, 29 février-2 mars 2012.

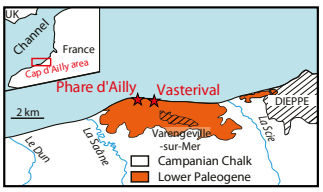
[83] Thiel, V., Sjövall, P., 2011. Using Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry to study biomarkers. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 39, 125-156.

a) La miliacine dans les sédiments du Lac du Bourget

Les concentrations en miliacine ont été mesurées sur des échantillons de sédiments du Lac du Bourget datés de l'âge du Bronze dans deux carottes distantes de 4km (LDB01 et LDB04). La remarquable similarité de l'évolution des concentrations, qu'il s'agisse des valeurs ou du timing des évènements (Figure 9), en dépit de modèles d'âges distincts, est très rassurante sur le niveau de confiance que l'on peut accorder à des enregistrements paléoenvironnementaux fondés sur des biomarqueurs moléculaires préservés dans des archives sédimentaires lacustres[84].

b) Le PETM dans le bassin de Dieppe

Malgré les fortes variations latérales de faciès observées dans les séries sédimentaires enregistrant le PETM dans le bassin de Dieppe, les successions végétales reconstruites à partir des biomarqueurs moléculaires sont remarquablement cohérentes entre deux coupes distantes de quelques kilomètres (Figure 22)[85]. Ainsi, au même titre que la miliacine dans les sédiments du lac du Bourget, l'enregistrement des variations environnementales pendant le PETM dans le bassin de Dieppe semble-t-il valable, ou du moins cohérent, à l'échelle locale, indépendamment des variations de faciès.



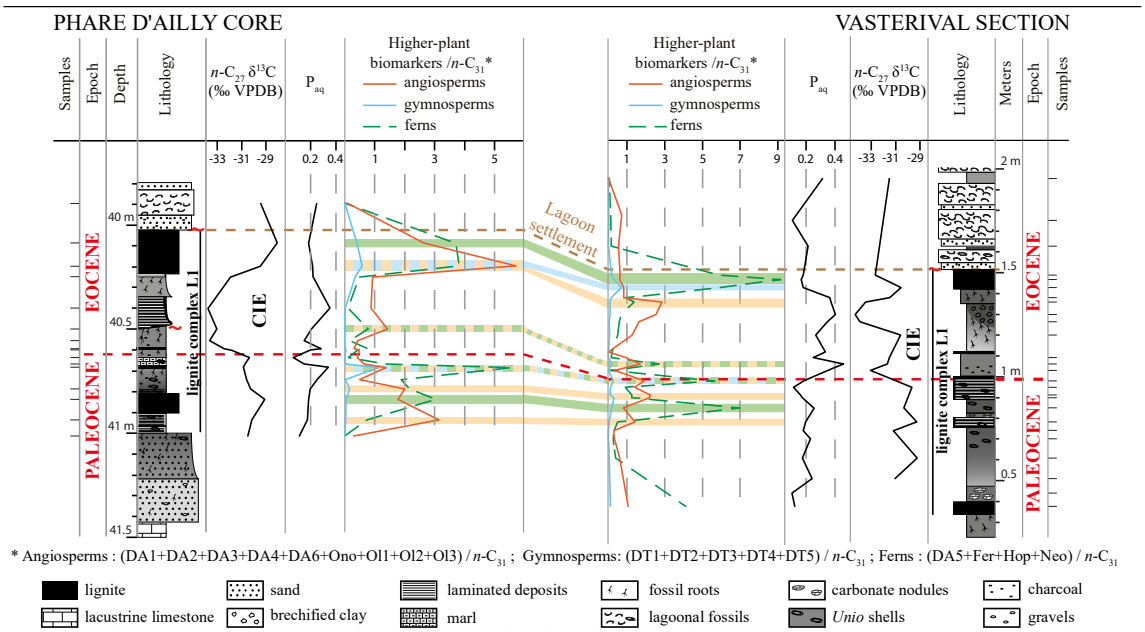


Figure 22 : Evolution des concentrations en biomarqueurs moléculaires le long de deux sections couvrant le PETM en Normandie. Garel et al., in prep.

7. Quelle est la signification temporelle des biomarqueurs moléculaires ?

L'une des questions récurrentes dans les études paléoenvironnementales est la contemporanéité du traceur (biomarqueur moléculaire en particulier) et de l'archive qui le contient, considérant le parcours du combattant que doit accomplir le biomarqueur entre sa source et l'archive dans lequel il

[84] Dubois, N., **Jacob, J.**, 2016. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives: A review. Frontiers in Ecology and Evolution 4:92, doi: 10.3389/fevo.2016.00092.

[85] Garel, S., **Jacob, J.**, Quesnel, F., Le Milbeau, C., Dupuis, C., Baudin, F., Schnyder, J. Consistency of vegetation changes revealed by two sedimentary biomarker records from a highly variable depositional environment. A case study from the Paleocene/Eocene boundary in the Cap d'Ailly area (France). En préparation pour Organic Geochemistry.

sera stocké. Des travaux anciens[86,87,88], confirmés par une étude récente[89], mettant tous en jeu la mesure du ^{14}C sur composés individuels, indiquent des décalages temporels de plusieurs centaines ou milliers d'années entre l'âge du sédiment et l'âge du biomarqueur, avec des conséquences parfois lourdes sur la crédibilité des biomarqueurs et des proxies en dérivant. Par exemple, les travaux de Ohkouchi et al. (2002)[90] sur les alcénones advectées ont porté un lourd préjudice à l'estimation des températures de surface de l'océan par la détermination de l'$Uk^{37'}$.

Avoir à l'esprit que de tels décalages peuvent exister n'évite pourtant pas des interprétations très provocantes sur, par exemple, le synchronisme entre changements climatiques globaux et dynamique de la végétation au Venezuela durant la Déglaciation[91]. En effet, les auteurs rapportent un décalage de 50 ans entre changements globaux (transition entre le Younger Dryas et le Bolling-Alleröd, par exemple) et changements de végétation au nord de l'Amérique du Sud (transition savane/forêt). Pour parvenir à cette conclusion, les auteurs considèrent le seul transport éolien des acides gras, et donc un temps de transit quasi-nul (à cet échelle) entre la source et l'archive. Soit !

a) Modalités de transfert plante-sol de la miliacine

Voir point A.1.II.3.d "Pertinence du δ^2H de la miliacine".

b) Analyses ^{14}C sur fractions lipidiques

Notre modeste contribution à cette question des décalages temporaires a été réalisée sur une série sédimentaire du paléolac de Sarlième (Massif Central) dans le cadre d'une collaboration avec J.G. Bréheret et C. Hatté. Le modèle d'âge posait quelques problèmes du fait de la présence de matières organiques tertiaires dans le bassin versant et d'une dynamique particulière du carbone. Nous avons daté par ^{14}C les extraits lipidiques de deux niveaux, considérant que les lipides pouvaient être davantage contemporains des sédiments qui les contiennent. Les résultats ont permis d'améliorer significativement le modèle d'âge[92] (Figure 23).

[86] Pearson, A., McNichol, A.P., Benitez-Nelson, B.C., Hayes, J.M., Eglinton, T.I., 2001. Origins of lipid biomarkers in Santa Monica Basin surface sediment: A case study using compound-specific $\Delta^{14}C$ analysis. Geochimica et Cosmochimica Acta 65, 3123–3137.
[87] Li, C., Sessions, A.L., Valentine, D.L., Thiagarajan, N., 2011. D/H variation in terrestrial lipids from Santa Barbara Basin over the past 1400 years: A preliminary assessment of paleoclimatic relevance. Organic Geochemistry 42, 15-24.
[88] Douglas, P.M.J., Pagani, M., Eglinton, T.I., Brenner, M., Hodell, D.A., Curtis, J.H., Ma, K.F., Breckenridge, A., 2014. Pre-aged plant waxes in tropical lake sediments and their influence on the chronology of molecular paleoclimate proxy records. Geochimica et Cosmochimica Acta 141, 346-364.
[89] French, K.L., Hein, C.J., Hagipour, N., Wacker, L., Kudrass, H.R., Eglinton, T.I., Galy, V., 2018. Millennial soil retention of terrestrial organic matter deposited in the Bengal Fan. Scientific Reports 8:11997, DOI:10.1038/s41598-018-30091-8
[90] Ohkouchi, N., Eglinton, T.I., Keigwin, L.D., Hayes, J.M., 2002. Spatial and temporal offsets between proxy records in a sediment drift. Science 298, 1224-1227.
[91] Hughen, K.A., Eglinton, T.I., Xu, L., Makou, M., 2004. Abrupt tropical vegetation response to rapid climate changes. Science 304, 1955-1959.
[92] Hatté, C., Bréheret, J.G., **Jacob, J.,** Macaire, J.J., Argant, J. Refining the Sarlième palaeolake (France) Neolithic chronology by combining several radiocarbon approaches. Radiocarbon 55, 979-992.

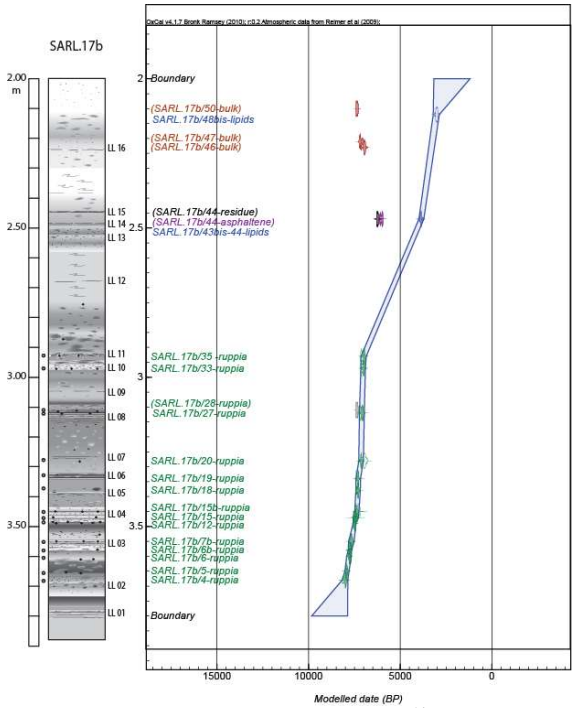


Figure 23 : Modèle d'âge de la carotte SARL17b établi sur la base de datations ^{14}C conventionnelles et complété par des dates ^{14}C sur extraits lipidiques.

8. Intégration spatio-temporelle des biomarqueurs dans les archives sédimentaires

La première partie de ce document visait à illustrer le champ des possibles qu'offrent les biomarqueurs moléculaires des sédiments pour retracer l'évolution des milieux continentaux sous la double emprise des changements climatiques et des activités anthropiques. La caverne d'Ali Baba. La seconde partie visait à alerter sur de potentiels biais, filtres qui peuvent altérer la représentation que donnent ces biomarqueurs moléculaires (et la matière organique sédimentaire en général) de la réalité des contextes aux époques étudiées. Disnar et al. avaient déjà formulé ce questionnement à l'occasion d'un congrès de limnogéologie en 2004[93]. Ces questionnements sont également implicites dans l'une des images les plus emblématiques en géochimie organique, initialement dessinée par Charles M. Schultz en 1962 (Figure 24a), et reprise par Pete Smith en 2007 pour le livre Echoes of Life[94] (Figure 24b).

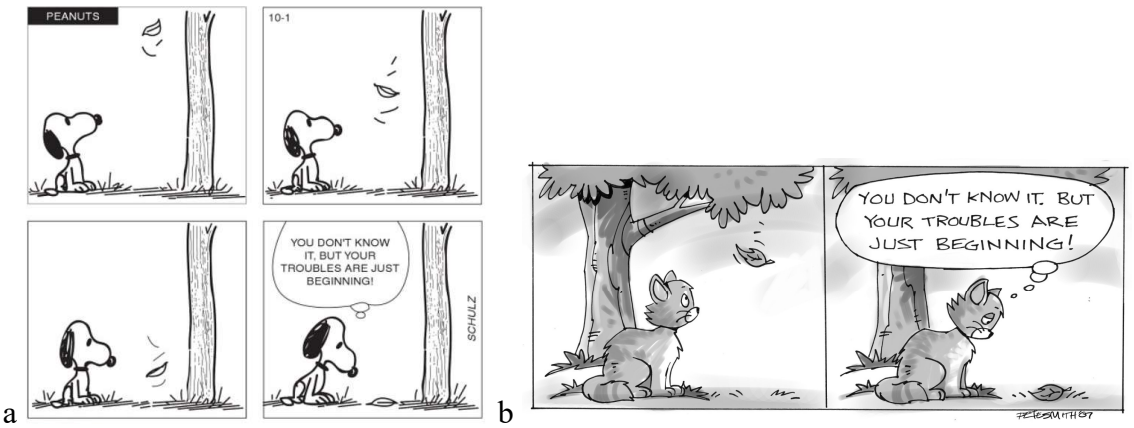


Figure 24 : Deux illustrations de C.M. Schultz et P. Smith résumant la géochimie organique et le long périplpe des biomarqueurs moléculaires depuis leur source jusqu'à l'archive sédimentaire.

[93] Disnar, J.R., Ogier, S., Maman, O., Stefanova, M., Guillet, B. et **Jacob, J.**, 2004. Quelle image la matière organique sédimentaire est elle susceptible de conserver de son environnement originel ? L'exemple d'un lac eutrophe : Aydat (Puy de Dôme, France). 47ème conférence de l'Association Française de Limnologie, Besançon, 5-8 juillet 2004.

[94] Gaines, S.M., Eglinton, G., Rullkotter, J. 2008. Echoes of Life: What Fossil Molecules Reveal about Earth History. Oxford University Press.

Dans la littérature scientifique, l'essemble de ces filtres et biais est considéré comme une boite noire. Pour le δ^2H moléculaire, par exemple, il s'agit selon Jacob et al. (2007[95], Figure 25) et Sachse et al. (2012[96], Figure 26) d'une "intégration spatio-temporelle des biomarqueurs dans les sédiments". Sachse et al. (2012) remarquent tout de même le très faible degré de connaissances des mécanismes qui oeuvrent dans cette intégration.

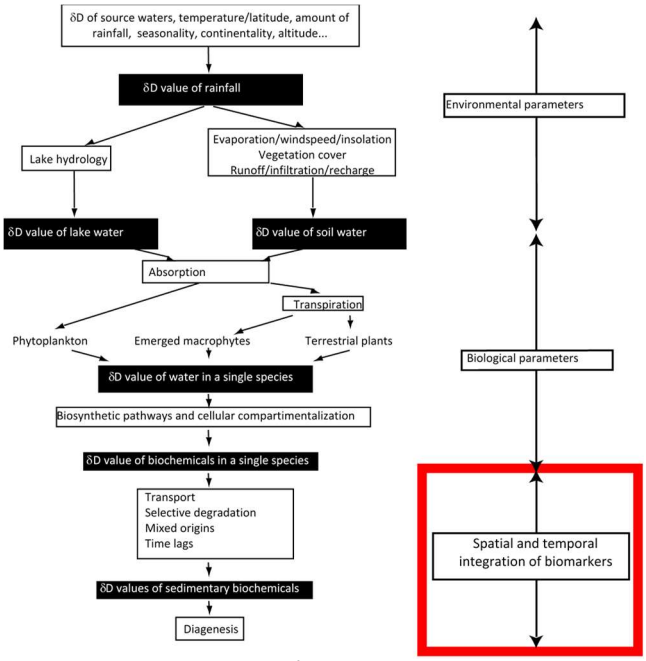


Figure 25 : Facteurs de contrôle du δ^2H moléculaire. D'après Jacob et al. (2007).

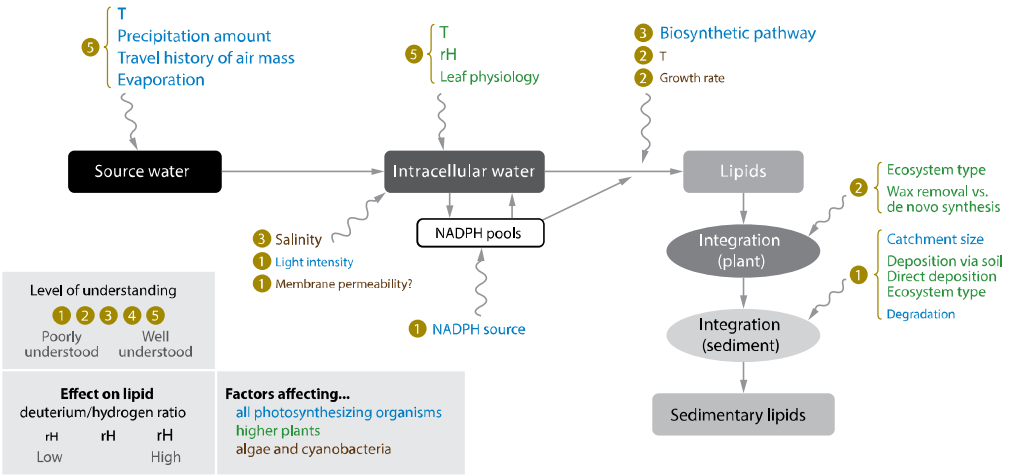


Figure 26 : Evaluation des degrés de connaissance sur les contrôles biotiques et abiotiques agissant sur le fractionnement isotopique de l'hydrogène depuis la source d'eau jusqu'aux lipides sédimentaires. D'après Sachse et al. (2012).

Ces biais/filtres qui peuvent affecter la représentation que donnent les biomarqueurs moléculaires sédimentaires du contexte dans lequel ils ont été produits sont nombreux et peuvent être listés et catégorisés, de manière non-exhaustive, de la manière suivante (Figure 27) :

➔ Diversité des contextes dans le bassin versant (micro-milieux, micro-climats, types de sol…),

[95] **Jacob, J.**, Huang, Y., Disnar, J.R., Sifeddine, Boussafir, M., A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2007. Paleohydrological changes during the last deglaciation in Northern Brazil. Quaternary Science Reviews 26, 1004-1015.
[96] Sachse D., Billault I., Bowen G.J., Chikaraishi Y., Dawson T.E., Feakins S.J., Freeman K.H., Magill C.R., McInerney F.A., van der Meer M.T.J., Polissar P., Robins R., Sachs J.P., Schmidt H.-L., Sessions A.L., White J.W.C., West J.B. and Kahmen A., 2012. Molecular paleohydrology: Interpreting the hydrogen-isotopic composition of lipid biomarkers from photosynthetic organisms. Annu. Rev. Earth Pl. Sci. 40, 221-249.

- ➔ Diversité des sources (type de plante, métabolismes, moments de production…),
- ➔ Diversité des moments de production,
- ➔ Diversité des quantités, proportions et compositions isotopiques des biomarqueurs produits,
- ➔ Diversité des modes et durées de transfert (distance à l'archive, transport éolien ou par lessivage, stockages temporaires, réactivité durant le transfert…),
- ➔ Répartition spatiale dans l'archive sédimentaire,
- ➔ Processus post-dépôt.

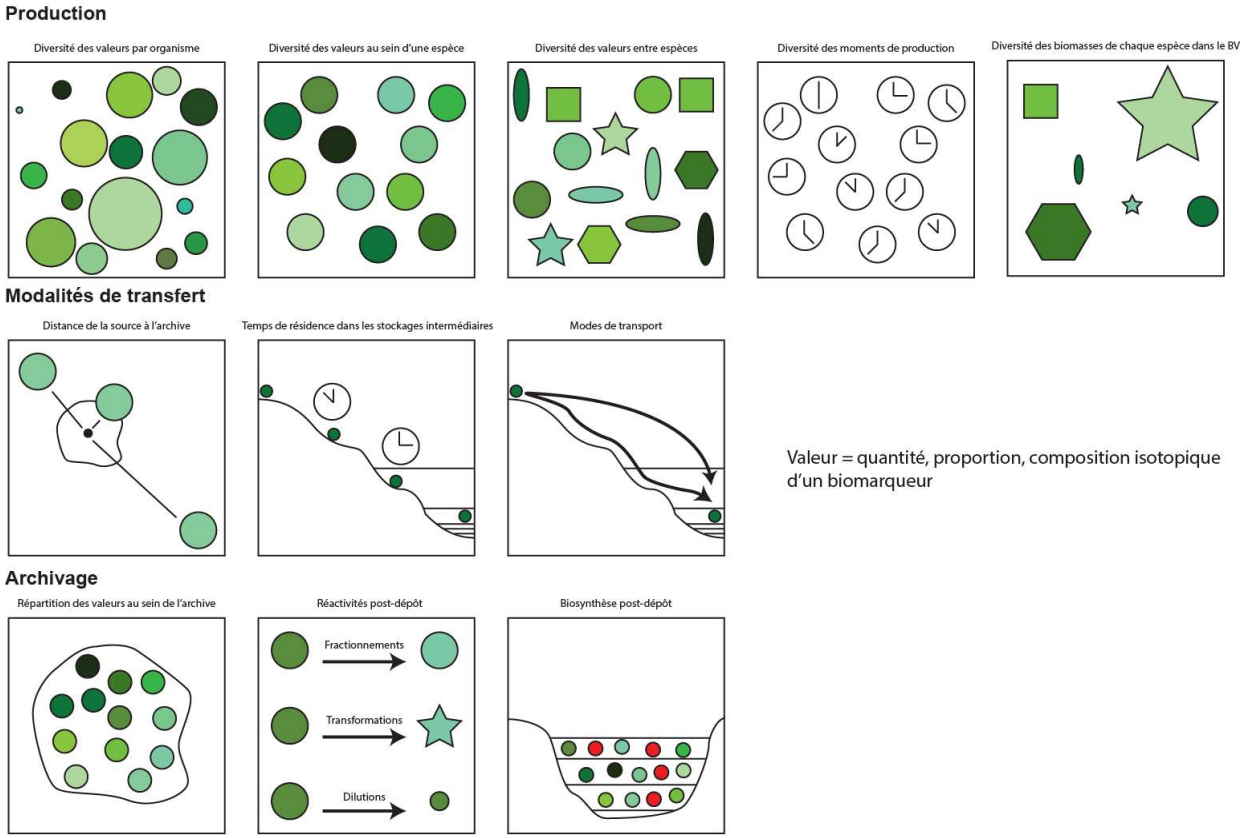


Figure 27 : Filtres et biais dans l'enregistrement des biomarqueurs moléculaires et de leur composition isotopique.

Malgré l'ensemble de ces éléments qui représentent un entrelas de facteurs biotiques et abiotiques susceptibles d'affecter la représentativité des biomarqueurs moléculaires, et donc la confiance en nos enregistrements, le peu de travaux réalisés indiquent que les biomarqueurs moléculaires représentent fidèlement les contextes, les conditions paléoenvironnementales, dans lesquels ils sont produits. L'exemple le plus remarquable est, à nouveau, extrait des travaux de Sachse et al. (2012)[97]. Dans la Figure 28, les auteurs comparent les valeurs de δ^2H de l'alcane *n*-C_{29} de sédiments superficiels de lacs européens avec celles du même composé dans différents types de plantes des bassins versant, et avec celles des précipitations annuelles sur les sites. Les valeurs de δ^2H du *n*-C_{29} des plantes, catégorisées par type de plantes, montrent peu de corrélations avec le δ^2H des précipitations annuelles. A l'inverse, les valeurs de δ^2H du *n*-C_{29} des sédiments semble montrer une bien meilleure corrélation.

[97] Sachse D., Billault I., Bowen G.J., Chikaraishi Y., Dawson T.E., Feakins S.J., Freeman K.H., Magill C.R., McInerney F.A., van der Meer M.T.J., Polissar P., Robins R., Sachs J.P., Schmidt H.-L., Sessions A.L., White J.W.C., West J.B. and Kahmen A., 2012. Molecular paleohydrology: Interpreting the hydrogen-isotopic composition of lipid biomarkers from photosynthetic organisms. Annu. Rev. Earth Pl. Sci. 40, 221-249.

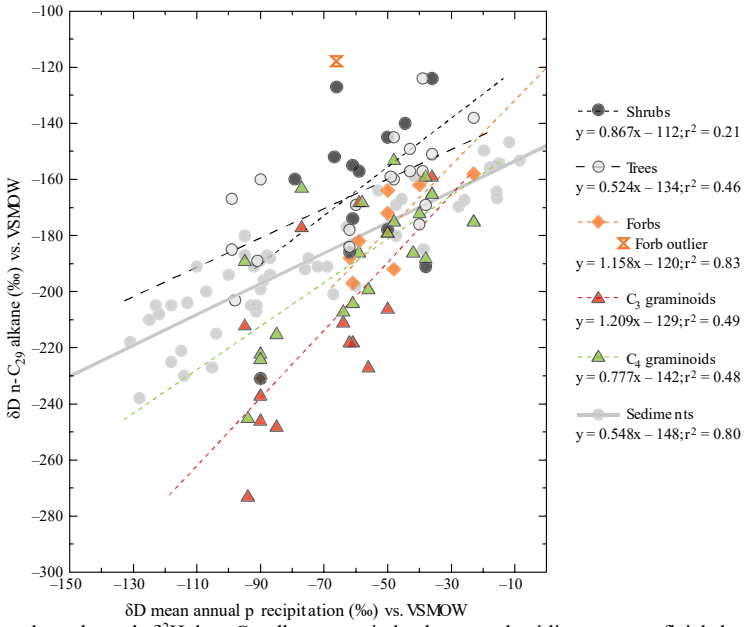


Figure 28 : Comparaison des valeurs de δ^2H du n-C_{29} alkane extrait de plantes et de sédiments superficiels lacustres avec les valeurs de δ^2H des précipitations annuelles correspondantes.

Ainsi, tout fonctionne comme si l'intégration des *n*-C_{29} des diverses plantes des bassin versants dans les sédiments conduit à une valeur de δ^2H du *n*-C_{29} sédimentaire plus fidèle aux δ^2H des précipitations que chacune des valeurs individuelles dans les plantes. Rapellons que Sarkar et al. (2014)[98]étaient parvenus aux mêmes conclusions dans son étude de la distribution spatiale des *n*-alcanes dans un bassin versant et des sédiments superficiels.

Ainsi, malgré l'ensemble des phénomènes qui pourraient altérer la représentation que donnent les biomarqueurs moléculaires dans les sédiments de la réalité de l'époque de leur production, il semble que l'image que nous percevons de cette réalité ancienne n'en soit pas si éloignée. De quoi perturber Platon ! C'est un "enchantement" que je ne comprends pas. Les Figures 29 et 30 tentent d'expliquer cette "magie" par analogie avec la réfraction des ondes lumineuses et avec la transmission d'information (cas du téléphone arabe).

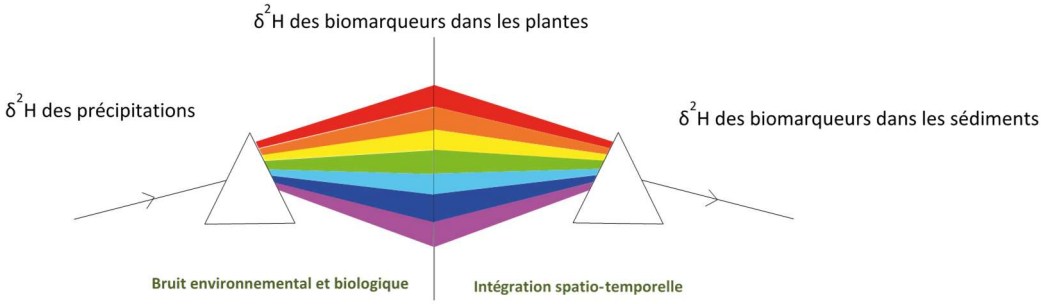


Figure 29 : Une vision très simplifiée des effets réciproques du "bruit environnemental et biologique" et de "l'intégration dans les temps et l'espace des biomarqueurs moléculaires" sur l'enregistrement d'une variable environnementale (ici le δ^2H des précipitations) qui, au final, semblent se compenser.

[98] Sarkar, S., Wilkes, H., Prasad, S., Brauer, A., Riedel, N., Stebich, M., Basavaiah, N., Sachse, D., 2014. Spatial heterogeneity in lipid biomarker distributions in the catchment and sediments of a crater lake in central India. Organic Geochemistry 66, 125-136.

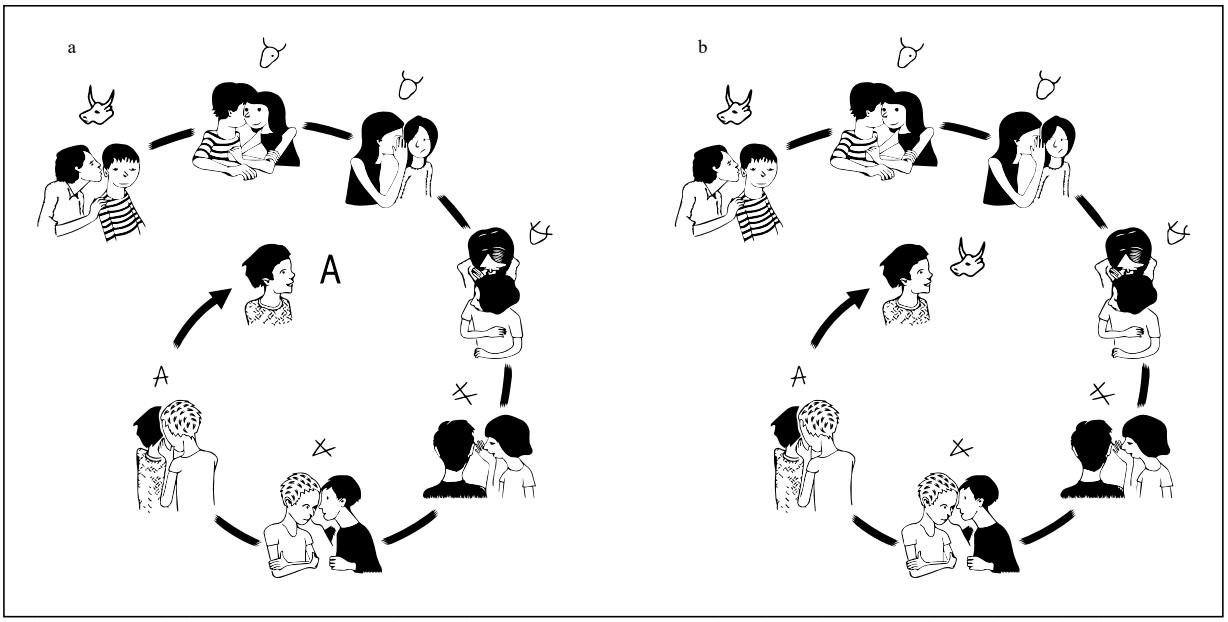


Figure 30 : Le téléphone arabe dans sa version classique (a), et transposé aux études paléoenvironnementales fondées sur les biomarqueurs moléculaires (b). Malgré l'ensemble des filtres et biais, le message initial n'est que très peu altéré.

Dans la première figure, si l'on considère la lumière initiale comme le paramètre environnemental initialement produit, un premier prisme (bruits environnementaux et biologiques) disperse cette lumière et une second prisme (intégration spatio-temporelle des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments) la rassemble pour obtenir une lumière comparable (au fractionnement isotopique près) à celle émise initialement. Dans l'exemple du téléphone arabe, l'information initiale est tronquée, déformée lors des différentes étapes de sa dissémination. Pour les biomarqueurs moléculaires, l'information finale semble conforme à l'information initiale.

Sur la base d'un profil de géologue/sédimentologue, puis de géochimiste organicien, mes travaux ont porté sur l'étude des changements climatiques et des activités anthropiques passés et leurs impacts sur les écosystèmes continentaux, par l'analyse de biomarqueurs moélculaires préservés dans les archives sédimentaires. Ces travaux m'ont permis de dialoguer avec de nombreuses communautés : phytochimistes, agronomes, climatologues, historiens, pédologues, botanistes, isotopistes, archéologues, physico-chimiste, physiologistes… Ce goût pour le dialogue interdisciplinaire, associé aux écueils rencontrés lors de l'interprétation des biomarqueurs moléculaires constitue l'une des motivations de mon projet de recherche

PROJET DE RECHERCHE

Vers une géochimie organique du ressenti et des sens

I. Prolégomènes – Indisciplinarité et créativité

"Etre dans le vent, c'est l'ambition des feuilles mortes" - Milan Kundera – Voir Figure 24

Mes activités se situent à la charnière des sciences de la Terre, des sciences du vivant, des sciences chimiques et, de plus en plus, des sciences humaines. Aussi, tout en nourrissant les questionnements scientifiques de disciplines consacrées, j'assume être attiré par les questionnements d'autres disciplines auxquels les approches, outils, raisonnements en rigueur dans ma/mes communauté(s) d'origine peuvent contribuer.

"Etre interdisciplinaire ce n'est pas être antidisciplinaire, c'est faire communiquer les disciplines" - Edgar Morin

Aussi, et au-delà de la sempiternelle interdisciplinarité, souvent promue, jamais réellement réalisée, je souhaite placer mes activités de recherche sous le sceau de l'indisciplinarité. Cette manière d'aborder le travail de recherche n'a rien de nouveau mais a bénéficié d'un ouvrage dédié en 2013[99]. Ce que j'en comprends c'est que, au lieu de faire dialoguer les disciplines sur des sujets communs, il s'agit de s'autoriser à s'approprier les questions scientifiques d'autres disciplines. Plutôt que de reformuler ses avantages et inconvénients, j'ai préféré citer quelques morceaux choisis. Si je souhaite placer mes activités dans l'indisciplinarité c'est certes par goût, mais c'est également parce que je considère que la géochimie organique est une science interdisciplinaire (exobiologie, archéologie, paléoclimatologie, sciences du sols, etc…) et qui, intrinsèquement, porte les germes de l'indisciplinarité. Il existe en effet des chantiers, des questions, qui requièrent des énergies qui dépassent le cloisonnement des disciplines.

"Nul n'ignore plus aujourd'hui combien les découvertes scientifiques et les innovations technologiques se produisent souvent à la marge des disciplines constituées. Lorsqu'on en retrace la genèse, c'est souvent moins la logique épistémique que l'audace et l'indiscipline qui apparaissent. Les exemples de sérendipité témoignent de la fécondité du hasard, et du génie des francs-tireurs qui savent s'en emparer. Il est d'ailleurs des périodes de l'histoire des sciences et des techniques où l'on n'hésite pas à célébrer le chaos organisateur qu'autorise le franchissement des frontières disciplinaires"[100]

Ce positionnement a aussi, et clairement, des désavantages, en particulier dans la perception et l'évaluation par les hiérarchies du travail indiscipliné: *"Les autorités (...) veillent à préserver l'intégrité des disciplines, allant jusqu'à pénaliser les chercheurs dont l'évaluation trahit un taux d'interdisciplinarité (sic) jugé excessif"*[101].

"Nul ne peut vivre longtemps à hauteur de volcan, surtout s'il est scientifique et qu'il doit accréditer doctement ses entreprises devant la communauté de ses pairs. Le « praticoinerte » des institutions est la fatalité qui soumet finalement le « groupe en fusion » des individus déliés, comme le montrait jadis Jean-Paul Sartre. ***L'indiscipline première risque toujours d'apparaître comme***

[99] Interdisciplinarité, entre disciplines et indiscipline. Revue Hermès n°67, CNRS Editions, p. 20-24.
[100] Besnier, J.M., Perriault, J., 2013. Résumé. Dans "Interdisciplinarité, entre disciplines et indiscipline". Revue Hermès n°67, CNRS Editions, p. 20-24.
[101] Besnier, J.M., Perriault, J., 2013. Introduction générale. Dans "Interdisciplinarité, entre disciplines et indiscipline". Revue Hermès n°67, CNRS Editions, p. 20-24.

un péché de jeunesse et la structure disciplinaire comme une accession à la maturité. *Cela serait vrai et plutôt désespérant si l'audace interdisciplinaire ne survivait pas au passage. L'aventure des sciences est riche en embardées et en débordements. Quand les chercheurs ressentent l'appel du large, il est rare qu'ils résistent à la tentation de nouer de nouvelles solidarités. L'interdisciplinarité est souvent le résultat de cette impatience des nouveaux continents. Vécue comme un risque à l'échelle de l'institution, elle s'accompagne de la jouissance des transgressions qui interdisent les retours en arrière, sinon sur le mode d'une stérile désillusion"*[102].

Au-delà des avantages reconnus à la sérendipité, *"l'hybridation disciplinaire est la clé de l'innovation scientifique et technique"*[103]. J'ai eu la chance de participer à l'école thématique "Pour une recherche créative sur les matières organiques" organisée par le ResMO à l'initiative de Yves Dudal et de Marie-France Dignac. Cette école a laissé des traces... En particulier la rencontre avec Vincent Boly (Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs, ENSGI, Nancy), qui nous a exposé les processus de créativité et en quoi ces processus ne sont pas inhérents à la démarche scientifique. Autrement dit : un chercheur n'est pas innovant par fonction ou statut. J'ai retenu quelques clés pour engager des recherches "créatives" : Etre à l'écoute des autres disciplines, fonctionner par analogie, ne pas faire de bibliographie pour éviter d'entrer dans le mainstream, accepter de produire des articles qui ne seront pas cités, quitte à souffrir d'un défaut d'évaluation.

"Creativity is combining facts no one else has connected before" - Christiane Nüsslein-Volhard

Les deux projets proposés dans ce document ont été construits en prenant largement en compte les clés d'indisciplinarité et de créativité enoncées ci-dessus. Ils sont développés en indiquant en premier lieu les raisons personnelles qui motivent ces projets, puis les contextes nationaux, internationaux transdisciplinaires, avant un rapide exposé concret des projets et, éventuellement, les premiers résultats montrant leur faisabilité.

II. Vers une géochimie organique du ressenti, une géochimie organique de l'Anthropocène

1. Motivations

a) Se connecter à la réalité/au quotidien

Comme relevé dans la partie Bilan, les résultats que nous avons produits ont amené des questionnements sur la représentativité des biomarqueurs moléculaires et des archives qui les contiennent. La confrontation de nos outils de diagnostic avec ceux proposés par les autres disciplines, la palynologie par exemple, ne répond que très partiellement aux questions soulevées sur la signification spatio-temporelle, sur la représentativité quantitative, sur la représentation de l'hétérogénéité des surfaces continentales de ces outils de diagnostic. Malgré le fameux "multi-proxy", il n'existe pas de moyen de contrôle de la véracité des scenarii proposés à la lecture des biomarqueurs moléculaires et de leurs compositions isotopiques dans les archives sédimentaires. Il semble nécessaire, pour répondre à ces questions, de confronter les enregistrements sédimentaires à une réalité, à du concret, à du quotidien.

"Quel est l'intérêt de mesurer les températures de l'Atlantique nord il y a 2000 ans ? Personne ne s'y baignait alors !" Michel Fontugne, 2003.

[102] Valade, B., Fabiani, J.L., Paquot, T., Laulan, A.M., Dosse, F., Renucci, F., Pélissier, M., 2013. Quand l'indiscipline originelle se "fige". Interdisciplinarité, entre disciplines et indiscipline. Revue Hermès n°67, CNRS Editions, p. 20-24.
[103] Besnier, J.M., Perriault, J., 2013. Introduction générale. Dans "Interdisciplinarité, entre disciplines et indiscipline". Revue Hermès n°67, CNRS Editions, p. 20-24.

b) Se rapprocher de l'humain

Le plus attrayant dans mes recherches des dernières années a été la possibilité de percevoir les activités humaines dans les archives sédimentaires. Il s'agissait de créer un lien entre la communauté des paléoenvironnementalistes qui traite des changements environnementaux dans les archives naturelles, sans vraiment percevoir l'activité humaine, et les archéologues qui s'intéressent, en contexte archéologique, à l'évolution des sociétés humaines (au sens large) sans disposer du cadre environnemental global ou de la continuité temporelle[104]. Ces travaux (culture du millet dans les Alpes, élevage au Groenland et rouissage du chanvre en Auvergne) ont offert un ancrage plus direct, mais imparfait, avec la réalité telle qu'elle est perçue/vécue par les populations. Il s'agit désormais d'aller au plus près de la description des sociétés humaines à travers, entre autres, des archives sédimentaires décryptées au moyen de biomarqueurs moléculaires spécifiques des activités humaines. L'objectif n'est pas ici de parvenir, par l'observation ou la rétro-observation, à tirer des lois socio-économiques du fonctionnement de la société humaine, à la modéliser, mais de contribuer, de manière alternative à la description, de son évolution.

"L'essentiel de l'être humain, de la société, de l'Histoire échappe aux algorithmes." Edgar Morin, 2017.

"Je m'inscris en faux contre cette vision classique mais naïve de la découverte des supposées lois de la nature. Elle néglige complètement le processus complexe de transformation au terme duquel la nature, domptée au sein du laboratoire, se laisse observer et caractériser par les outils conceptuels et techniques de la science" - Pablo Jensen[105]

c) Raccorder les temporalités

Au-delà de ces objectifs, ce projet offre également une opportunité conceptuelle : raccorder les temporalités entre les gammes de temps accessibles à l'observation (de la seconde à quelques années) et celles accessibles à la rétro-observation au moyen d'archives sédimentaires (de l'année dans les meilleurs cas aux millions d'années). Le paléoenvironnementaliste ne peut confronter ses interprétations des environnements passés à la réalité de l'époque. Dans ce projet, l'archive est ancrée dans la réalité du quotidien ou de l'histoire récente. Cela permet d'affiner les interprétations sur la manière dont l'archive sédimentaire se construit est en quoi elle est représentative des évènements qui surviennent dans le bassin versant.

Une analogie peut ici encore être construite avec les systèmes d'information et la communication. Le bassin versant/l'écosystème est un lieu de production d'information (populations qui le peuplent, relations – trophiques, structurelles… - entre ces populations, nature des sols, conditions climatiques…). Il paraît légitime de s'interroger sur la fidélité d'une information archivée dans des sédiments récents par rapport à l'information produite au quotidien. Un parallèle peut être fait avec l'information en continue dont nous abreuve les chaines d'information en temps réel (le drainage des bassins versants) et les livres d'histoire (l'archive sédimentaire). Que retiendra la postérité sédimentaire du quotidien d'un bassin versant actuel ?

[104] Guilaine, J. 2000. Changeons d'échelles : pour la très longue durée, pour de larges espaces. Etudes Rurales 153-154, 9-21.
[105] Grousson, M., 2018. L'impossible modélisation de la société. Le Journal du CNRS, 29/08/2018.

2. Opportunités : des sujets émergents

a) L'Anthropocène



Figure 33 : "Welcome to the Fabulous Anthropocene Era". Reprise graphique de l'installation de Robin Wollston qui a détourné le panneau original "Welcome to the fabulous Las Vegas" désigné par Betty Willis en 1959.

L'Anthropocène[106,107], nouvelle époque géologique, se singularise de l'Holocène par l'impact prégnant des activités humaines sur les processus géologiques[108]. L'existence et la date de début de cette nouvelle époque sont largement débattues, notamment parce que l'Anthropocène revêt un caractère interdisciplinaire marqué (géologie, anthropologie, archéologie, sociologie…). Le groupe de travail sur l'Anthropocène missionné par la Commission Internationale de Stratigraphie (ICS) a rendu un premier verdict fin août 2016[109] lors du Congrès International de Géologie. Après examen de propositions foisonnantes émises par différentes communautés (voir[110]), il valide l'Anthropocène comme nouvelle époque, considère son début vers 1950, mais à condition que la communauté développe des efforts pour trouver un "Clou d'Or" ou "Golden Spike" (plus formellement Global Boundary Stratotype Section and Point ou GSSP), de manière à ensuite être en capacité de soumettre cette proposition à validation par l'ICS. Le Clou d'Or recherché est le premier jalon de l'Anthropocène qui doit avoir comme caractéristiques d'être enregistré dans les archives géologiques par un niveau repère à la signature géochimique univoque (Figure 32) et valable à l'échelle du globe. Le groupe de travail est désormais à la recherche d'un GSSP[111].



Figure 32 : L'Anthropocène : Où est la limite ?
Illustration de Lionel Calvin.

Ce concept d'Anthropocène et la définition qui en est donnée actuellement par le groupe de travail me conviennent parfaitement pour plusieurs raisons : du part, je considère que le groupe de travail respecte à la lettre les critères de définition d'une subdivision et de ses limites. Du moins sa limite inférieure ! D'autre part parce que ce concept ou ce slogan permet d'aggréger de nombreuses disciplines autour d'un objet bien identifié, et donc est propice à de l'innovation. Tellement bien identifié qu'il raisonne auprès des médias et du grand public et est ainsi un vecteur efficace de la science vers les citoyens. Il est accessible et appropriable par tous.

Pourtant, en juillet 2018, la Comission Internationale de Stratigraphie entérine la subdivision de l'Holocène en trois étages : le Greenlandien (11 700-8236 b2k – before AD2000), le Northgrippien (8236-4250 b2k) et le Meghalayen (4250-actuel) qui devient la plus jeune subdivision de l'échelle des temps géologiques[112]. Si le groupe de travail dédié est respectable, l'intérêt d'une telle subdivision et des élements qui ont permis d'aboutir à une telle décision ont suscité, au minimum, l'incompréhension d'une large part de la communauté[113], et la mienne. Il est

[106] Crutzen, P.J. et Stoermer E.F., 2000. The Anthropocene. IGBP Newsletter 41, 12.
[107] Crutzen, P.J., 2002. Geology of Mankind. Nature 415, 23.
[108] Zalasiewicz et al., 2015. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. Quaternary International 383 196-203.
[109] Chauveau, L., 2016. Les géologues du monde entier sont à la recherche du clou d'or. Sciences et Avenir, 01/09/2016.
[110] Lewis, S.L., Maslin, M.A., 2015. Defining the Anthropocene. Nature 519, 171–180.
[111] Waters, C., 2018. The Anthropocene: an overview of geological assessment to date. Colloque Q11, Orléans, 13-15 février 2018.
[112] International Chronostratigraphic chart v2018/07 - http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-07.pdf
[113] Voosen, P., 2018. New geological age comes under fire. Science 361, 537-538.

cocasse de constater que cette décision, désormais entérinée par la Comission Internationale de Stratigraphie, est fondée sur des arguments plutôt légers, si l'on considère les procès faits à l'Anthropocène. L'argumentaire sur la nécessité d'une subdivision est le suivant : "the Holocene is the only geological unit of Series status that remains undivided". Soit ! La base du Meghalayen est établie sur l'évènement à 4.2 kyr, évènement qui n'est pas enregistré de manière systématique et uniforme à la surface du globe. Enfin, les GSSP des limites Pleistocène/Greenlandien et Greenlandien/Northgrippien sont établis sur des carottes de glace, des archives qui ne semblent par pérennes, alors que c'est l'un des critères premiers pour la définition d'un GSSP.

Au total, cette décision semble avoir été construite sur des critères stratigraphiques moins objectifs que ceux retenus pour l'Anthropocène, alors que ceux-ci ont largement été critiqués. Par exemple, dans sa tribune du Monde[114], Patrick de Wever reproche à l'Anthropocène d'être considéré comme une ère (la proposition n'est pourtant pas ferme), alors que sa durée est bien trop courte comparée aux autres ères (mais la durée n'est pas un critère de définition !). Il reproche également à l'Anthropocène un début diachrone (la tribune date de 2016 avant les conclusions de 2018 sur la date de 1950). Pourtant, aucune subdivision de l'échelle des temps géologiques ne bénéficie d'une telle résolution sur sa limite ! De Wever questionne également la nécessité même d'introduire une subdivision à l'Holocène, considérant que, plus que du domaine de l'échelle des temps géologiques, l'Anthropocène est du domaine de lhistoire humaine, comme la Renaissance ou l'Antiquité. L'un des reproches majeurs sur l'Anthropocène, et repris par ailleurs, est sans doute la référence à l'Homme, et donc le procès d'anthropocentrisme qui est fait à l'Anthropocène. Bien entendu, par définition. Mais cela n'est pas incompatible avec les critères de l'ICS. Tout comme le fait que cette décision aura des conséquences politiques et philosophiques non négligeables (responsabilisation / culpabilisation). Du moins davantage que les débat sur le Précambien. Mais le fait scientifique apparaît solide : par leurs activités, les sociétés humaines ont modifié le cycle naturel des éléments et matières, suprassant à certains égards les phénomènes naturels, et ces changements sont inscrits de manière durable et étendue dans le registre géologique.

A travers plusieurs sessions dédiées à l'Anthropocène proposées ces dernières années (ASF 2015, Goldschmidt 2017, PAGES Open Science Meeting 2017, Q11 en 2018), j'ai pris conscience d'un glissement général des paléoenvironnementalistes français vers les périodes les plus récentes, et des forces considérables dont disposait la communauté française à l'échelle internationale.

Ainsi, et pour paraphraser Woody Allen, l'Anthropocène est la temporalité qui m'intéresse, car je compte bien y développer mes recherches durant les prochaines années. Elle permet de raccord de temporalités entre les échelles d'observation et de rétro-observation, la connexion au plus près des sociétés humaines actuelles et de leur Quotidien.

"L'avenir est la seule chose qui m'intéresse, car je compte bien y passer les prochaines années" – Woody Allen

b) Nouvelles matières de l'Anthropocène

La définition de l'Anthropocène, telle qu'elle est désormais envisagée, est intimement liée à la question des matières extraites, produites, transformées par les sociétés et à la manière dont elles subsistent dans l'enregistrement sédimentaire. Depuis la préhistoire, l'Humain a modifié les équilibres en favorisant certaines production végétales et animales par domestication, le sous-sol par l'extraction de matières minérales et organiques, les a concentrées, puis transformées ou synthétisées. Lors d'une session de la Goldschmidt 2017[115], nous avons souhaité discuter l'ensemble de ces matières, dans une acceptation plus large de l'Anthropocène que celle désormais admise. L'inventaire des matières exploitées est vaste. L'inventaire des matières transformées ou de synthèse est sans doute encore plus large : des premières productions fromagères aux transformations de l'atome, et celles permises par la génétique sur le vivant. Inutile de vouloir être exhaustif dans cet

[114] De Wever, P., 2016. Anthropocène : sujet géologique ou sociétal ? Le Monde du12/09/2016.
[115] Organic Geochemistry of the Anthropocene – from Stratigraphy to Earth System. Goldschmidt 2017, 13-18 août 2017, Paris.

inventaire des matières synthétiques dont les volumes n'ont cessé d'augmenter depuis le 18ème siècle[116]. Les minéralogistes ont compté 208 nouveaux minéraux directement attribuables aux activités humaines sur les 5000 répertoriés[117]. La profusion de types de plastiques, l'explosion de leur production, et leur radiation dans tous types d'environnement[118] jusqu'à constituer un sixième (septième, huitième) continent dans le Pacifique Sud[119], a conduit à la proposition de nouvelles matières d'intérêt géologique comme le plastiglomérat[120], et à la prise de conscience de l'étendue.



Figure 34 : Nouvelles matières, nouveaux objets de l'Anthropocène. Voir crédits dans les sources citées dans le texte.

Ces matières ont été dispersées, de matière volontaire ou non, dans l'environnement, si bien que certaines, voire la plupart, sont conservées dans le registre sédimentaire. Parmi les matières ou objets les plus emblématiques ou anecdotiques qui persistent dans l'environnement, un pot de yaourt des jeux olympiques de 1976[121], des emballages de barres chocolatées Raider[122], ou des cassettes d'un jeu vidéo mettant en scène E.T. et jamais commercialisé [123], tous datant de plus de vingt ans (Figure 34).

Ces nouvelles matières relarguées dans les milieux posent évidemment des problèmes environnementaux majeurs. Une large communauté scientifique dédie ses activités aux impacts des contaminants/polluants dans les écosystèmes actuels. Des questionnements subsistent toutefois sur les impacts environnementaux des concentrations de matières liées aux activités humaines anciennes, ouvrant la voie à une paléoécotoxicologie. Il y a tout un pan de recherche qui reste, à mon avis, inexploré. Lors de l'ASF 2015, j'avais interrogé la communauté sur la signification que nous pouvions donner aux traceurs moléculaires de l'anthropisation. La miliacine est un traceur du millet. L'impact de la culture du millet sur les sols a pu être discuté. Mais nous n'avons pu mesurer ce que la production à relativement grande échelle de matières organiques C4 induisait comme modifications dans le cycle du carbone local, voire comment cela s'incorporait dans les chaînes trophiques à travers le $\delta^{13}C$ de la matière et des molécules organiques à l'âge du Bronze[124]. L'afflux de miliacine a-t-il également eu des effets sur les communautés biologiques dans les sols, dans les eaux lacustres, voire sur les organismes peuplant le sédiment ? Après tout, la miliacine présente, au même titre que d'autres triterpènes pentacycliques, des activités antifongiques, antibactériennes avérées. Les mêmes questions se posent sur le rouissage du chanvre en Auvergne durant le moyen âge. L'impact du rouissage sur les milieux aquatiques est connu depuis, au moins, le 18ème siècle. Mais que connaissons-nous de l'impact direct d'afflux de cannabinol sur les communautés biologiques ?

[116] Bernhardt, E.S., Rosi, E.J., Gessner, M.O., 2017. Synthetic chemicals as agents of global change. Frontiers in Ecology and Environment 15, 84–90, doi:10.1002/fee.1450.
[117] Hazen, R.M., Grew, E.S., Origlieri, M.J., Downs, R.T., 2017. On the mineralogy of the "Anthropocene Epoch". American Mineralogist 102, 595-611.
[118] Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Ivar do Sul, J.A., Corcoran, P.L., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Gałuszka, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Steffen, W., Summerhayes, C., Wagreich, M. Williams, M., Wolfe, A.P., Yonan, J., 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. Anthropocene 13, 4-17.
[119] Moore, C., Morre, S., Leecaster, M., et Weisberg, S., 2001. A Comparison of plastic and plankton in the north Pacific Central Gyre. Marine Pollution Bulletin 42, 1297-1300.
[120] Corcoran, P.L., Moore, C.J., Jazvac, K., 2014. An anthropogenic marker horizon in the future rock record. GSA Today, 24, juin 2014, doi: 10.1130/GSAT-G198A.1
[121] Sur une plage du Pas-de-Calais, il retrouve un yaourt... des JO 1976 de Montréal. Le Huffington Post, 26/11/2016.
[122] Finistère. Sur la plage, un emballage de "Raider" vieux de 25 ans... Ouest France, 26/01/2014.
[123] Rushe, D., 2014. New Mexico landfill to be dug up in search of 'buried' Atari ET video games. The Guardian, 25/04/2014.
[124] Soltysiak, L., 2011. Peut-on mesurer l'impact de l'implantation d'une végétation de type C4 dans un bassin versant par le δ13C de biomarqueurs moléculaires ? Application à l'arrivée du millet autour du Lac du Bourget vers 1700 av J.C. Stage de recherche M1. OSUC, 2011.

Au final, les matières de l'Anthropocène, et en particulier les matières synthétiques, constituent pour le paléoenvironnementaliste de l'Anthropocène une formidable opportunité car elles offrent des traceurs variés d'une multitude de sources, processus, procédés et pratiques, et sont donc des descripteurs potentiels des archives géologiques de l'Anthropocène.

c) L'Astysphère, nouveau territoire des géochimistes de l'Anthropocène

L'Anthropocène se singulariserait donc de l'Holocène par la nature des matières, des volumes/quantités et flux qui se développent au sein du système Terre et qui sont potentiellement archivées dans le registre géologique. Par analogie avec l'Hydrosphère, la Cryosphère, l'Asténosphère, voire la noosphère…[125], la notion d'Anthroposphère rend compte de ces échanges singuliers. Au sein de l'Anthroposphère, les auteurs ont distingué l'Agrosphère (milieux ruraux) et l'Astysphère[126] (milieux urbains). La ville est en effet l'écosystème (ou le socio-écosystème) le plus emblématique de l'Anthropocène, puisque (1) la population urbaine est passée de 730 millions à 3,7 milliards entre 1945 et 2015 ; (2) les matières et énergies qui y circulent sont sans commune mesure avec celles des autres écosystèmes, notamment de par la nature, les rapports élémentaires et isotopiques[127] des matières, ce qui a donné prétexte à l'émergence de la géochimie urbaine[128][129] et à la définition du "métabolisme urbain", métaphore biologique pour décrire l'interconnexion entre le fonctionnement socio-économique et bio/physico/chimique de la ville. Une session de l'AGU a d'ailleurs été consacrée à ce métabolisme urbain[130], preuve que les géologues se saisissent du sujet. L'Astysphère constitue un concentré de matières candidates à la définition du Clou d'Or, puisqu'elles y sont concentrées, variées, et potentiellement archivées dans des objets géologiques. Parmi ces matières, citons, de manière non-exclusive, les plastiques[131] et autres "technofossiles", les radionucléïdes liés aux essais nucléaires atmosphériques ou aux accidents, les contaminants organiques (médicaments et métabolites, drogues…) et les métaux lourds. Jay Quade a ainsi imaginé une hypothétique coupe géologique levée par un géologue du futur à travers ce que fut une ville nord-américaine (Figure 35). Le métabolisme urbain y a laissé son empreinte, marque par des rapports isotopiques et des teneurs élémentaires qui sortent du fond géochimique.

Comme le relève T. Paquot[132], et pour faire écho aux éléments développés plus haut, *"Aborder les questions relatives aux territoires urbanisés, à l'urbanisme, à l'environnement des villes — et des villes comme environnement — nécessite l'apport de diverses disciplines. Chaque discipline a son histoire, ses notions, ses concepts, ses principes, ses publications, ses cursus, ses modalités pédagogiques, ses modes de recrutement, ses remises en cause, ses crises, ses renouvellements, etc."*. Donc, la ville est LE territoire des innovations et de la créativité car au carrefour de nombreuses disciplines.

[125] Vernadsky, V.I., 1926. Biosfera. Nauka, Leningrad
[126] Norra, S., 2009. The astysphere and urban geochemistry—a new approach to integrate urban systems into the geoscientific concept of spheres and a challenging concept of modern geochemistry supporting the sustainable development of planet earth. Enviro. Sci. Pollut. Res. 16, 539-545.
[127] Dean, J.R., Leng, M.J., Mackay, A.W., 2014. Is there an isotopic signature of the Anthropocene? The Anthropocene Review 1-2. DOI: 10.1177/2053019614541631
[128] Chambers, L.G., et al., 2016. Developing the scientific framework for urban geochemistry. Applied Geochemistry doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.01.005.
[129] Ludden, J. et al., 2015. Geochemically based solutions for urban society: London, a case study. Elements 11, 253-258.
[130] "Characterizing, Modeling and Extending Urban Metabolism" - AGU fall meeting, 2011, San Francisco.
[131] Zalasiewicz, J. et al., 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. Anthropocene 13, 4-17.
[132] Paquot, T., 2007. Transedisciplinarité. EspacesTemps.net, Dans l'air, 2007/01/31. URL : https://www.espacestemps.net/articles/transedisciplinarite

J'ai proposé une session dédiée aux Géosystèmes Urbains à l'occasion de la RST 2016 pour faire le point sur les recherches dans ces milieux singuliers, entre différentes communautés (archéologues, spécialistes de l'assainissement et paléoenvironnementalistes) en France, Ce fût l'occasion de connexions entre experts de l'assainissement, archéologues urbains et géochimistes/sédimentologues. Ici encore, le constat est que nous disposons en France de réelles forces qu'il reste à mettre en synergie.

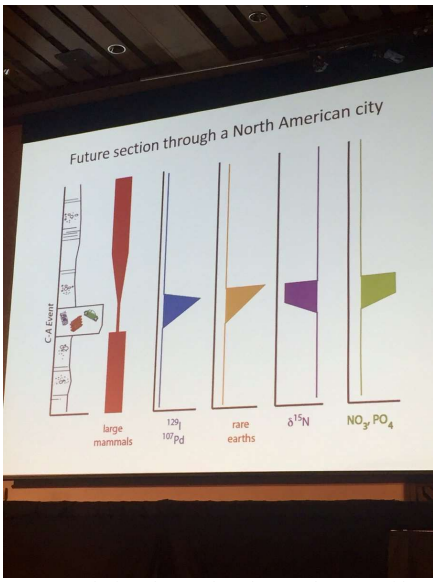


Figure 35 : Evolution du nombre de grands mammifères, des ^{129}I, ^{107}Pd, $\delta^{15}N$, terres rares, NO_3 et PO_4 dans une section géologique future hypothétique traversant une ville nord-américaine. © Jay Quade, Université d'Arizona.

Dans la prospective INSU/SIC de 2013-2017, la ville était identifiée comme un territoire vierge d'études paléoenvironnementales malgré ses atouts, les passerelles disciplinaires, et les espaces d'innovation que cela représente. A ce titre, l'INSU soutient des observatoires des milieux très fortement anthropisés, comme les Observatoires d'Hydrologie Urbaine (OPUR à Paris, ONEVU à Nantes et OTHU à Lyon) au sein de URBIS. Malgré cette volonté, la lettre de cadrage de l'exercice de prospective 2017 indique que "le milieu urbain, identifié comme un défi aux interfaces lors de la précédente prospective, reste un objet d'étude à investir, pertinent face à l'urbanisation croissante, qui devrait intégrer l'observation et la labellisation d'Observatoires ou réseaux d'Observatoires, et la nécessaire pluri-disciplinarité au-delà de la communauté SIC, par exemple en association avec des géographes, ou des archéologues".

d) Relations avec la société

Imaginé en ville, au plus près (temporellement et spatialement) des sociétés humaines, le projet de transposition des approches paléoenvironnementales et de la géochimique organique aux milieux urbains présenté ici permet des connexions immédiates avec les citoyens, les pouvoirs publics et le tissu économique.

i. Sciences participatives

Initiées dans les années 1970 (avec des prémices au XVIème siècle pour la botanique), les initiatives de sciences participatives connaissent une explosion ces dernières années et s'inscrivent comme des alternatives de plus en plus crédibles à la construction des savoirs. L'objectif le plus visible est, bien entendu, la collection en masse de données (dont la fiabilité peut être discutée), en, particulier dans les sciences naturalistes qui ne nécessitent pas de moyens techniques extravagants et sont accessibles aux non-experts. Donc, la multiplication dans le temps et dans l'espace des observateurs. Plus largement les actions de sciences participatives permettent de créer un espace de dialogue et d'action entre citoyens et chercheurs[133], et donc de rendre le citoyen plus acteur. De la pure collecte de données, les projets ont progressivement évolué vers de l'implication plus précoce des citoyens, jusqu'à la construction même du projet de manière à engager le citoyen et adapter les projets académiques aux besoins citoyens – avec un biais inévitable sur le pilotage de la recherche. A travers ces actions, les objectifs sont également de sensibiliser le citoyen à la science et à la recherche; de développer l'esprit critique qui lui est essentiel pour mieux maîtriser les débats scientifiques et les enjeux sociétaux (changement climatique, perte de biodiversité, OGM, pesticides, vaccins, nanoparticules…). Bref, de produire des citoyens impliqués, engagés et éclairés.

[133] Storup, B., Millot, G., Neubauer, C., 2012. La recherche participative comme mode de production des savoirs. Un état des lieux des pratiques en France. Fondation Sciences Citoyennes

Pour les plus jeunes, ce mode d'action permet une formation à la recherche et donne précocement le goût des sciences quand l'on constate un désaveu pour les sciences.

J'ai retenu quelques projets particulièrement inspirants comme exemples :

- Vigie nature : Observatoires de la biodiversité

Il s'agit sans doute du projet le plus médiatique en France, créé dès 1989 qui a débuté par l'observation des oiseaux communs puis s'est élargi à d'autres groupes (papillons, escargots…). Par le recensement de la faune et de la flore, les citoyens contribuent à une meilleure connaissance de la biodiversité et de la manière dont les changements globaux l'impactent.

- FRIPON : Observatoire des météorites

Dans la même lignée, un réseau de 100 caméras a été développé en France pour surveiller le ciel, repérer des bolides, déterminer leurs trajectoires, et éventuellement collecter les météorites.

- Fold-it

Fold-it est un serious game en ligne de type puzzle qui permet aux chercheurs d'augmenter leur connaissance sur la structure 3d des protéines en lien avec leur fonction. Les données produites lors de parties par les joueurs sont autant de simulations. Ainsi, Fold-it bénéficie-t-il d'une puissance de calcul incomparable.

Plus proche de nos préoccupations, des initiatives de sciences citoyennes se développent en climatologie et paléoclimatologie :

- Isoscapes (Gabriel Bowen, Université d'Utah, Etats-Unis)

Gabriel Bowen produit des cartes de composition isotopique des eaux de précipitations. Lors de l'ouragan Sandy (2012), il a proposé un exercice de collecte des eaux de pluies sur la liste de diffusion ISOGEOCHEM. Plus de 100 volontaires ont participé à l'initiative entre le 28 octobre et le 2 novembre, parmi lesquels des collèges et lycées. Les cartes produites sont le résultat de cet effort collectif.

- Annotation collaborative des données météorologiques dans les carnets de bord des navires britanniques

Philip Brohan (paléoclimatologue, Royal Mereorological Society) propose l'annotation collaborative en ligne des carnets de bord de plus de 200 navires ayant parcouru le pacifique au début du 20ème siècle, accédant ainsi à plusieurs milliers de données météorologiques enfouies dans les archives et désormais numérisées.

ii. Des outils d'évaluation et d'aide à la décision

Durant une réunion de prospective sur la Paléo à l'ISTO, D. Pierre (PAST, ANTEA Group) nous a sensibilisés aux innovations possibles en termes d'outils d'aide à la décision pour les industriels, collectivités locales, Syndicats et Agences, et à l'apport décisionnel que pourrait avoir l'étude des archives sédimentaires.

Comme le relèvent Ludden et al. (2015)[134], les challenges principaux pour que les données géochimiques soient réellement prises en compte dans les décisions politiques concernant la ville sont de deux ordres : (1) la communication, car il faut expliquer la complexité des résultats et leur

[134] Ludden, J., Peach, D., Flight, D., 2015. Geochemically Based Solutions for Urban Society. Elements 11, 253-258.

portée et (2) dépasser le cadre descriptif pour parvenir à des solutions et convaincre les décideurs de les mettre en place. Un exemple du premier point est le retentissement de l'étude, très inspirante, de Néfau et al. (2013)[135]. Sur la base des concentrations en drogues et en leurs métabolites dans les eaux usées, les auteurs ont établi une cartographie de leur consommation en France. Les titres de la presse relatant ces travaux sont symptomatiques de l'accueil que peut recevoir ce type d'étude, et bien loin des objectifs et conclusions des auteurs : "La France droguée : Lille, capitale de la cocaïne et du cannabis, Montpellier de l'ecstasy"[136]. La polémique suscitée par ce travail a eu de telles répercussions que les politiques s'en sont mêlés[137]. Yves Lévi, co-auteur de ce travail, insiste pourtant sur l'intérêt de ce type de monitoring pour aider à la définition des politiques : *"notre méthode permet de déterminer des zones précises pour cibler les politiques de prévention. C'est un outil indispensable pour les Agences régionales de la santé, les élus locaux ou les associations"*.

Ainsi, et sur la base de questions de recherche très académiques, ce projet n'exclue pas des réalisations très appliquées, ou au moins d'intérêt immédiat pour les décisionnaires.

3. Projet

a) Reconstruire une histoire urbaine intégrée, objective et multithématique

Comme déjà indiqué, la plus grande frustration dans les études paléoenvironnementales est de ne pas pouvoir vérifier les scenarios établis par la lecture d'archives sédimentaires sur l'évolution des écosystèmes, climats et sociétés du passé. Par ailleurs, mes recherches m'ont conduit de plus en plus vers la perception des sociétés humaines et de leur évolution à travers les traceurs d'anthropisation. Mon projet vise à transposer les approches paléoenvironnementales à des contextes très récents et très anthropisés. J'ai donc décidé d'opérer une mutation radicale dans mes activités de recherche en choisissant l'Anthropocène comme période d'étude, le socio-écosystème le Ville comme terrain de jeu, et les polluants (en particulier organiques), dans leur multitude, comme traceurs du fonctionnement actuel et passé de cette surface continentale. Le socio-écosystème "ville" peut être considéré comme un analogue des bassins versant naturels, soumis à des stress essentiellement anthropiques, et dans lesquels des matières sont produites/consommées, puis drainées dans les réseaux d'assainissement avant d'être potentiellement archivées. Les archives sédimentaires et les traceurs qu'ils contiennent intègrent l'ensemble des processus du bassin versant, et offrent ainsi une nouvelle vision, plus objective de son évolution, que les données textuelles. Si l'histoire de la ville est effectivement archivée dans des séries sédimentaires, l'étude de ces dernières peut apporter une vision spatialement intégrée, multi-thématique, et temporellement continue du métabolisme urbain durant l'Anthropocène. Je souhaite produire des enregistrements chronologiquement très détaillés, comparés à l'illustration de Jay Quade (Figure 35), dans lesquels les apparitions et disparitions de substances au gré des évolutions des techniques, des pratiques et des réglementations sont inscrites dans l'enregistrement géologiques.

b) Explorer les accumulations sédimentaires dans les réseaux d'assainissement

Où rechercher des accumulations sédimentaires comparables à celles utilisées classiquement en paléo et permettant d'atteindre les objectifs, c'est-à-dire de forts taux de sédimentation et une large diversité de traceurs potentiels qui permette d'aborder une large diversité de thématiques ? Mon parti-pris est de rechercher de telles archives dans les réseaux d'assainissement. C'est en effet le lieu principal de transfert de matières en contexte urbain, si l'on omet les transferts de surface (à pied, en voiture, en camions…) qui ne produisent pas d'accumulation. Ces réseaux d'assainissement

[135] Nefau, T., Karolak, S., Castillo, L., Boireau, V., Levi, Y., 2013. Presence of illicit drugs and metabolites in influents and effluents of 25 sewage water treatment plants and map of drug consumption in France. Science of the Total Environement 461-462, 712-722.
[136] http://www.docbuzz.fr/2013/09/17/123-la-france-droguee-lille-capitale-de-la-cocaine-et-du-cannabis-montpellier-de-la-methamphetamine/
[137] https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/2013/09/20/lille-championne-de-france-de-consommation-de-cocaine-et-de-cannabis-martine-aubry-conteste-322631.html

constituent un maillage complet de la ville qui draine les flux d'eaux usées et d'eaux pluviales (en réseau séparatif ou unitaire) depuis les particuliers et industries/services jusqu'aux solutions de traitement (stations d'épuration, etc…). Ils absorbent donc une formidable diversité de traceurs potentiels, organiques et inorganiques qui, potentiellement, s'accumulent.

"Sautez dans l'urinoir pour y chercher de l'or. Je suis vivant et vous êtes morts" - Philip K. Dick (Ubik)

Ces réseaux sont constitués d'une multitude d'ouvrages dont la fonction est de transporter les matières de la manière la plus efficace, tout en autorisant des pré-traitements : canalisations, stations de relèvement pour remettre en circulation des sédiments accumulés dans les réseaux, dégrilleurs pour retirer les objets flottants, deshuileurs pour les matières grasses, etc. Les accumulations de matières dans ces réseaux constituent un problème récurrent de gestion si bien qu'elles sont régulièrement curées. La fréquence de curage est dépendante du type d'ouvrage (stations de relèvements, bassins de décantation) mais tourne autour de plusieurs mois à quelques années. Aussi, des séries sédimentaires déposées sur ces échelles de temps, avec des puissances pouvant atteindre plusieurs mètres peuvent être espérées. Les opérations de curage permettent de renouveler le potentiel d'accommodation de ces ouvrages. Une remise à zéro du compteur pour archiver de nouvelles histoires. Dans des cas très favorables (pour cette étude), des ouvrages peuvent fonctionner sur des durées plus étendues, permettant d'accéder à des temporalités de l'ordre de la décennie ou de plusieurs décennies. Sans compter les ouvrages "fossiles" ou "archéologiques", qui ont fonctionné dans le passé mais qui sont désormais délaissés, déconnectés des réseaux d'assainissement opérationnels ou qui présentent des défauts d'entretien. Considérant les dynamiques sédimentaires dans les réseaux d'assainissement, des fenêtres temporelles allant de quelques heures à quelques mois, années ou décennies peuvent dont être explorées. Il s'agit donc ici d'un changement radical dans les échelles de temps abordées dans les études paléoenvironnementales puisque les échelles de temps abordées deviennent conciliables/comparables à celles de l'observation, et conciliables avec le quotidien, donc avec le ressenti par les populations.

c) Basculer des biomarqueurs "paléo" aux biomarqueurs "humains"

Après la miliacine ou le cannabinol, l'objectif de mon projet est de progresser vers des biomarqueurs des activités anthropiques, du quotidien des sociétés urbaines : des biomarqueurs "humains". Ces biomarqueurs (et traceurs, plus généralement), ne sont ni plus ni moins que les contaminants, polluants, micropolluants, xénobiotiques… sur lesquels, en particulier, les communautés "écotox" s'escriment depuis de nombreuses années, avec des questions partagées sur leur origine, leur dynamique et réactivité et, surtout, leur devenir dans les milieux naturels. Le projet présenté ici bénéficie donc d'un foisonnement d'études sur ces biomarqueurs humains, qu'il s'agisse de leurs sources, mais surtout de leur comportement pendant leur transfert (et accessoirement de l'efficacité des divers traitements). Pourtant, il ne s'agit pas ici de considérer ces composés comme des polluants, mais comme des outils de diagnostic, des traceurs du fonctionnement socio-écosystème ville, autorisant une lecture multithématique à travers leurs flux dans les eaux usées et leur évolution dans les archives sédimentaires. Une large communauté œuvre depuis quelques décennies sur l'information socio-économique, et notamment en termes de santé publique qui peut être obtenue par l'analyse de composés organiques dans les eaux usées (voir plus bas le Wastewater-based Epidemiology)[138]. Bien qu'ayant peu d'interactions avec les géochimistes organiciens paléoenvironnementalistes, elle partage déjà un vocabulaire commun puisque "human biomarker" est déjà d'usage dans cette communauté[139] (la troisième communauté utilisant le terme de biomarqueur pour des composés organiques étant les médecins). Inutile d'être exhaustif dans

[138] Kasprzyk-Hordern, B., Bijlsma, L., Castiglioni, S., Covaci, A., de Voogt, P., Emke, E., Hernández, F., Ort, C., Reid, M., van Nuijs, A.L.N., Thomas, K.V., 2014. Wastewater-based epidemiology for public health monitoring. Water and Sewerage Journal 4, 25-26.
[139] Gracia-Lor et al., 2017. Measuring biomarkers in wastewater as a new source of epidemiological information : current state and future perspectives. Environment international 99, 131-150.

l'inventaire de ces biomarqueurs puisque leur diversité est quasi-infinie. L'essentiel des efforts est actuellement porté sur les médicaments et drogues illicites[140] consommés et excrétés dans les eaux usées. Les chercheurs surpassent les filtres et biais divers (dilution, flux, pourcentage d'excrétion, diagenèse, partition solide/liquide, normalisation par la taille de la population) de manière à estimer les consommations, doses, leurs évolutions temporelles (voir ci-dessous) et inégalités spatiales. Cette approche est également employée pour déterminer les consommations d'alcool[141,142], de tabac[143]. D'autres biomarqueurs moléculaires sont déjà largement mesurés, sont en cours de développement, ou peuvent être imaginés et dans les eaux usées[144] : pesticides (herbicides, insecticides et fongicides), café[145], produits cosmétiques et de bien-être[146] (parfums, crèmes solaires, excipients), compléments alimentaires, marqueurs spécifiques du type d'alimentation, produits de combustion et de pyrolyse, mais aussi hydrocarbures et HAP provenant des essences et huiles, des bitumes de la voirie, plastiques, plastifiants et dérivés, surfactants, PCB, solvants, détergents, matériaux de construction (bois et traitements, peintures, additifs, résines…), et enfin biomarqueurs "naturels" témoins de la biodiversité en ville. Il est également possible d'imaginer de nombreux autres traceurs qui pourraient constituer des indicateurs originaux et alternatifs du fonctionnement de la ville : ^{14}C des matières organiques comme indicateur de la proportion de matières fossiles transitant en milieu urbain ; $\delta^{13}C$ comme indicateur de la proportion de plantes C4/C3 dans l'alimentation, etc…

Le quotidien urbain offre une autre convergence avec la paléo. Ces dernières années, l'ADN environnemental a ouvert des champs infinis à l'imaginaire sur ce qui peut être reconstruit dans les séries sédimentaires anciennes. Dans le même temps, des études révèlent l'apport des techniques de séquençage ADN dans les eaux usées et sédiments dans les réseaux d'assainissement[147]. Si de l'ADN était préservé dans les séries sédimentaires des réseaux d'assainissement, cela ouvrirait des perspectives innovantes sur, par exemple, la rétro-observation de maladies émergentes, rares, ou disparues.

A travers l'ensemble de ces traceurs (restreint ici aux organiques), je souhaite accéder à une vision intégrée de l'ensemble des problématiques du métabolisme urbain (santé et bien-être, transports, énergies, alimentation, qualité de vie, urbanisme et construction…).

d) Raccorder les temporalités entre l'observation et la rétro-observation

Ce nouveau terrain de jeu doit me permettre de comprendre comment se construit l'archive sédimentaire en regard des évènements qui rythment le quotidien, et donc d'aborder la question de la représentativité, des filtres et des biais (spatiaux, temporels, quantitatifs) entre production et archivage, évoquée plus haut. Il faut donc étayer ces travaux de rétro-observation des métabolismes urbains à partir d'archives sédimentaires par un effort d'observation des productions et transferts de matière en temps réel dans le cadre d'une métrologie environnementale adaptée aux contextes hyper-anthropisés.

De telles initiatives d'observations géochimiques du milieu urbain fleurissent à travers le monde. En particulier, un nouveau champ de recherche visant à réaliser un monitoring épidémiologique par l'analyse des eaux usées a récemment vu le jour : wasterwater-based epidemiology (WBE). Il s'agit de suivre l'évolution des concentrations en médicaments et drogues dans les eaux usées pour

[140] Ort, C., et al, 2014. Spatial and temporal differences in illicit drug use in Europe quantified by sewage analysis. Addiction 109, 1338-1352.
[141] Reid, M.J., et al, 2011. Analysis and interpretation of specific ethanol metabolites, ethyl sulfate, and ethyl glucuronide in sewage effluent for the quantitative measurement of regional alcohol consumption. Alcohol Clin. Exp. Res. 35, 1593-9.
[142] Mastroianni, N., Lopez de Alda, M., Barcelo, D., 2014. Analysis of ethyl sulfate in raw wastewater for estimation of alcohol consumption and its correlation with drugs of abuse in the city of Barcelona. Journal of Chromatography A 1360, 93-99.
[143] Castiglioni, S., et al, 2014. A novel approach for monitoring tobacco use in local communities by wastewater analysis. Tobacco Control.
[144] Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-Hordern, B., 2014. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. Water Research doi: 10.1016/j.watres.2014.08.053.
[145] Chen, Z., Pavelic, P., Dillon, P., Naidu, R., 2002. Determination of caffeine as a tracer of sewage effluent in natural waters by on-line solid-phase extraction and liquid chromatography with diode-array detection. Water Research 36, 4830-4838.
[146] Ellis, J.B., 2006. Pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in urban receiving waters. Environmental Pollution 144, 184-189.
[147] Herper, M., 2014. How DNA sequencing in sewers could detect disease outbreaks. Forbes, 11 décembre 2014.

évaluer les modes et variabilités de consommation, un mode opératoire qui semble plus efficace que les études auprès des populations[148,149]. Le réseau européen SCORE ou le National Wastewater Drug Monitoring Program en Australie se sont construits pour échanger des bonnes pratiques de mesure (intercalibration) et permettre des comparaison géographiques et temporelles dans les usages de drogues et de médicaments. En parallèle du suivi de médicaments et drogues dans les eaux usées, les développements sur le séquençage ADN permet d'imaginer cartographier les populations microbiennes dans les eaux usées à l'aide de capteurs[150] ou dans les stations de métro[151] pour localiser des foyers d'infection (pathomap) ou des contrôles environnementaux sur la distribution des bactéries (en écho aux questions de représentativité spatiale développées plus haut), de confronter l'estimation de population via ADN aux relevés démographiques (en écho aux questions de représentativité quantitative développées plus haut) identifier la présence d'ADN de pathogènes (peste bubonique, anthrax), voire (Figure 36). Si l'essentiel des thématiques abordées sont liées, pour le moment, à la santé, d'autres thématiques pourront être rapidement explorées si l'on considère la diversité des traceurs transitant dans les réseaux d'assainissement (Figure 36).

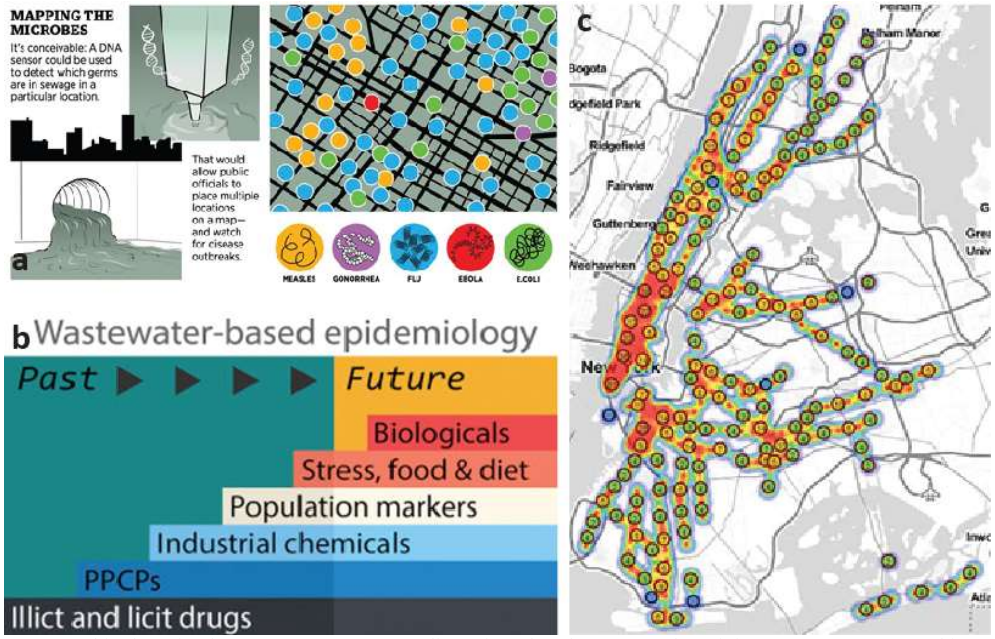


Figure 36 : a. "Cartographier les microbes". Des capteurs ADN disséminés dans les réseaux d'assainissement pour cartographier et prévenir les maladies. Crédits : Patrick Welsh. b. Futur des traceurs du métabolisme urbain dans les réseaux d'assainissement (Choi et al., 2018). c. Carte des profils ADN réalisés dans les stations de métro de New York (Afsginnekoo et al., 2015).

Ces dispositifs de suivi constituent un point d'appui fort pour parvenir à l'ambition de raccorder les temporalités entre les échelles temporelles de l'observation et de la rétro-observation. Pour reprendre l'analogie avec les sciences de l'information, les flux de matière transitant dans les réseaux d'assainissement sont comparables aux chaînes d'information en continu tandis que le sédiment archivant sur le long terme les informations est comparable aux livres d'histoire (Figure 37).

"If you are at the mouth of a wastewater treatment plant, you essentially can observe all the chemistry that is being used in a city" - Rolf Halden, Arizona State University

[148] Yang, Z., Castrignano, E., Estrela, P., Frost, C.G., Kasprzyk-Horden, B., 2016. Community sewage sensors towards evaluation of drug use trends: detection of cocaine in wastewater with DNA-Directed Immobilization Aptamer Sensors. Scientific Reports 6, 21024.
[149] Choi, P.M., Tscharke, B.J.T., Donner, E., O'Brien, J.W., Grant, S.C., Kaserzon, S.L., Mackiel, R., O'Malley, E., Crosbie, N.D., Thomas, K.V., Mueller, J.F., 2018. Wastewater-based epidemiology biomarkers: Past, present and future. Trends in Analytical Chemistry 105, 453-469.
[150] Herper, M., 2014. How DNA Sequencing In Sewers Could Detect Disease Outbreaks. Forbes, 11 décembre 2014.
[151] Afshinnekoo, E., Meydan, C., Chowdhury, S., Carlton, J.M., Levy, S., Mason, C.E., 2015. Geospatial resolution of human and bacterial diversity with city-scale metagenomics. Cell Systems 1, 72-87.



Figure 37 : Une analogie sur les biais opérant sur l'archivage de l'information entre le temps réel/quotidien (eaux usées et information continue) et les archives long terme (archives sédimetnaires et livres).

i. Confronter des métriques physico-chimiques à des métriques sociétales

Confronter aux textes, aux données, aux faits

Pour exploiter au mieux les informations extraites des archives sédimentaires il est nécessaire de confronter les informations recueillies par retro-observation avec les informations plus immédiates fournies par les données textuelles/documentaires. Par exemple, les quantités de médicaments consommées estimées par la mesure des concentrations dans le réseau d'assainissement peuvent être confrontées aux chiffres de ventes disponibles auprès des pharmaciens ou agences de santé. Une étude remarquable propose par exemple d'estimer en temps réel la population d'un bassin versant (et donc les flux) par la mesure du coprostanol dans les eaux usées[152]. Les chiffres obtenus sont assez comparables à ceux des recensements. La finale de la Coupe du Monde 2018 de football a fourni le prétexte pour mesurer l'activité de la population française en réponse aux évènements survenus pendant le match. Au moyen du réseau sismologique français, Jérôme Vergne a relevé dans le bruit de fond sismique enregistré par le réseau sismologique français des perturbations correspondant aux divers évènements qui ont ponctué la finale (buts français, mi-temps, fin de match: Figure 38). En parallèle, les données opérationnelles (ici besoins en eau dans plusieurs stations de l'agglomération orléanaise, données SUEZ) témoignent d'une baisse de la consommation au début du match, puis une plus forte consommation pendant la mi-temps, une nouvelle baisse en seconde mi-temps, puis une nouvelle augmentation peu de temps après le coup de sifflet final. Cet exemple de la finale de la Coupe du Monde 2018 n'est pas isolé. Diaz et al. (2017)[153] montrent ainsi que pas monitoring sismique il est possible d'identifier par sismique les vibrations émanant des évènements locaux tels le trafic routier ou l'activité liée au métro, les concerts, feux d'artifice ou matchs de football. Ainsi, des moyens d'observation du domaine de la géologie s.l. (sismique et hydrologie urbaine) peuvent-ils être détournés pour répondre à des questions bien éloignées de celles qui prévalent dans les communautés d'origine.

[152] Daughton, C.G., 2012. Real-time estimation of small-are population with human biomarkers in sewage. Science of the Total Environment 414, 6-21.
[153] Diaz, J., Ruiz, M., Sanchez-Pastor, P.S., Romero, P., 2017. Urban Seismology: on the origin of earth vibrations within a city. Scientific Reports 7:15296. OI:10.1038/s41598-017-15499-y

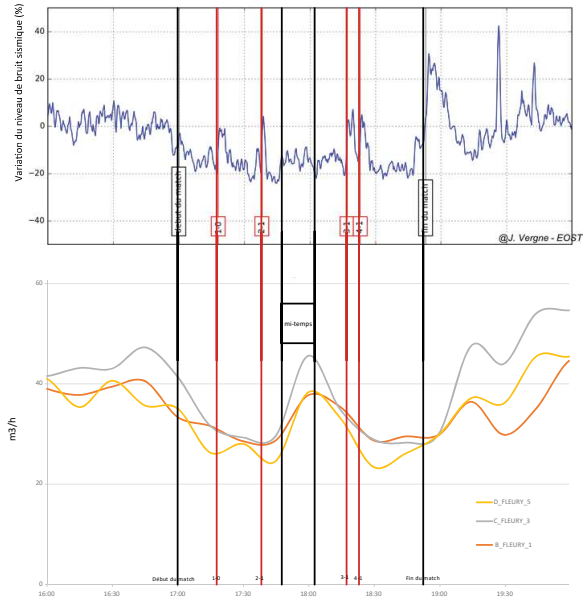


Figure 38 : Evolution du bruit sismique (©J. Vergne – EOST) dans les 74 stations du réseau sismologique français (RESIF) et des débits d'eau mis en distribution par Suez dans les stations de Fleury les Aubrais l'après-midi du 15 juillet 2018, jour de la finale de la Coupe du Monde de football.

Une telle confrontation nécessitera une collaboration étroite avec des sociologues, spécialistes de la santé, urbanistes, spécialistes des politiques publiques, historien contemporains, etc de manière à mettre en relation les paramètres physico-chimiques mesurés avec des indicateurs socio-économiques pertinents.

Confronter au ressenti et au déclaré

Au-delà des faits, textes et données socio-économiques, les mesures physico-chimiques peuvent également être confrontées à des données collectées en temps réel sur les réseaux sociaux, ou par data-mining de ces réseaux sociaux. En effet, les réseaux sociaux fournissent une quantité phénoménale d'informations en temps réel, localisées, et multi-sources, et bien entendu teintées de subjectivité. Des initiatives visant à exploiter ces données produites de manière collaborative (crowdsourcing) à des fins de recherche pointent leur nez en Sciences de la Terre. M. Agius indique ainsi, dans une interview au blog de l'EGU[154], que l'analyse des données provenant de Twitter et Facebook doit permettre de mieux identifier l'épicentre, la magnitude et les impacts précoces de séismes. Les données brutes, les images associées, la recherche de mots-clés, l'analyse sémantique des commentaires pour relier les sentiments à des données chiffrées et objectives, mais surtout le foisonnement de données puisque chaque citoyen devient capteur, sont autant d'éléments qui permettent ensuite une perception complémentaire de l'évènement. Dans un autre registre, l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais envisage, en complément de données opérationnelles sur les hauteurs d'eau et débits, un suivi des réseaux sociaux lors d'évènements de fortes précipitations[155]. Dans notre cas, et considérant la sur-concentration de données provenant des réseaux sociaux potentiellement exploitables en contexte urbain, il sera possible d'envisager suivre l'émergence d'une épidémie, d'évènement météorologiques, de pollutions localisées, d'évènements culturels par le suivi temps-réel ou le data mining des réseaux sociaux, monitoring qui sera confronté aux données d'observation et de rétro-observation. Des initiatives en ce sens se sont déjà déployées pour développer des systèmes d'information fondés sur l'analyse (sémantique en particulier) de données extraites de l'internet des objets et des personnes (réseaux sociaux) pour développer des services d'aide à la décision ou dédiés aux usagers afin de rendre la ville plus intelligente ("Smart City", voir exemple de CityPulse).

[154] http://geolog.egu.eu/2014/08/08/geotalk-matthew-agius-on-how-online-communication-can-help-identify-earthquake-impact/
[155] Boudevillain, B., Delrieu, G., 2016. L'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais. 25ème Réunion des Sciences de la Terre, Caen, 24-28 octobre 2016.

Expérimenter dans le cadre de projets de Sciences Participatives

La ville est déclarée comme terrain d'observation mais peut également constituer un terrain d'expérimentation, dans le cadre de sciences participatives. Au-delà de la collecte d'information sur les pratiques et usages, sur les modes de consommation ou sur la santé, la ville pourra devenir un terrain d'expérimentation. Une expérimentation provoquée par les citoyens, ce qui les rendra plus impliqués dans les projets de recherche. Par exemple, il est raisonnable d'envisager demander à la population d'un bassin versant, d'un quartier ou d'un ilot d'agir sur les flux de matières (consommation de sources végétales C3/C4, suivi épidémiologique, déclaration d'évènements susceptibles d'affecter les flux de matière dans le réseau d'assainissement, etc…). Par le retour d'information sur l'évolution de traceurs diagnostics dans les eaux usées et sédiments, la population pourra constater l'efficacité de ses actions (réduction des rejets …) et s'adapter. Par ailleurs, la confrontation des données ainsi obtenues avec celles des flux dans le réseau d'assainissement permettra de mieux comprendre les filtres entre mesures physico-chimiques, les production/consommations et le ressenti. Mon projet participera ainsi plus directement aux relations Sciences/Société que ce que permettaient mes anciennes thématiques, grâce à une relation plus étroite avec la population.

ii. Conclusion partielle

La connexion plus immédiate avec la réalité perçue/vécue par les populations, permet d'envisager des débouchés très appliqués à ces études. Il ne s'agit pas d'un objectif premier, mais d'un dégât collatéral. D'une part, la retro-observation au moyen du décryptage d'archives sédimentaires, et sa confrontation avec des données textuelles permettra **d'évaluer les politiques ou plus largement les actions publiques passées**. D'autre part, l'observation en temps réel des transferts de matières dans les réseaux d'assainissement, couplée au data-mining des réseaux sociaux, permettra de construire des **systèmes d'alerte** sur différentes thématiques (santé, pollution…) à destination des pouvoirs publics, des citoyens et des industriels du traitement de l'eau. Un observatoire des pratiques tel que l'imagine R. Moilleron (LEESU) au sein de l'Observatoire des Polluants Urbains (OPUR) à Paris, en considérant les réseaux d'assainissement comme des outils de gestion de la ville, des Sentinelles du Milieu Urbain, en référence aux Sentinelles de la Santé Publique[156] à Standford, aux Sentinelles de la Nature de France Nature Environnement, mais aussi aux Sentinelles de l'Environnement promues lors de la prospective SIC 2017.

S'il existe déjà de nombreuses initiatives pour confronter les données de monitoring géochimique, hydrologique ou géophysique au vécu des populations (voir plus haut), aucune étude paléoenvironnementale ne propose de reconstruire la chronologie fine et multi-matières de l'Anthropocène / du métabolisme urbain au moyen de sédiments accumulés dans les réseaux d'assainissement. Seules quelques études paléoenvironnementales sur des archives hyper-récentes en contexte urbain ont été réalisées dans des aqueducs et fontaines[157,158]. Ce projet constitue donc une réelle prise de risque. Il est un terroir potentiel d'innovations scientifiques et techniques transformant non seulement pour la communauté "Paléo", mais bien au-delà. A la lumière des premiers résultats significatifs (voir plus bas) et de leur accueil dans différents congrès, en attendant la valorisation par publications, je me sens conforté dans cette prise de risque.

Au total, les idées défendues dans ce projet s'ancrent dans un mouvement général des sciences de la Terre et de l'Environnement vers l'époque récente et vers les milieux urbains. Elles s'intègrent aussi pleinement. En premier lieu dans la volonté exprimée en Edito de la prospective SIC 2013-2017 de plus d'interdisciplinarité, vers les sciences du vivant mais aussi les sciences de l'Homme et de la société.

---

[156] Chorbak, U., 2016. DNA in wastewater could provide clues to help community health, Stanford researchers say. Stanford News, 12 décembre 2016.

[157] Pons-Branchu, E. et al. (2015). Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems. Sci. Tot. Env. 15, 86–96.

[158] Pons-Branchu, E. et al. (2014). A geochemical perspective on Parisian urban history based on U-Th dating, laminae counting and yttrium and REE concentrations of recent carbonates in underground aqueducts. Quaternary Geochronology 24, 44-53.

4. Premiers résultats

Ce projet a été organisé selon cinq axes. Le premier visait à quantifier l'évolution de l'urbanisation dans un quartier d'Orléans. Le second à tester l'achivabilité du message sédimentaire dans deux lacs artificiels d'Orléans. Le troisième à étudier la dynamique temporelle des polluants organiques dans les réseaux d'assainissement (temps court – journée, semaine, mois). Le quatrième à comprendre la construction de cette archive sédimentaire singulière (temps intermédiaire : jour, mois, saison, année). Le cinquième à retracer l'évolution d'Orléans depuis plusieurs décennies par l'étude d'une carotte sédimentaire longue (temps long – année, décennies). Les trois derniers axes ont été développés dans le cadre du projet Golden Spike, retenu en 2017 et 2018 par le comité Biohefect (EC2CO/CNRS). L'ensemble de ces travaux a bénéficié d'une collaboration étroite avec les services de l'AgglO d'Orléans qui, intéressés par notre démarche, nous ont facilité les accès aux installations. Une convention lie d'ailleurs l'ISTO et l'AgglO sur ce projet.

a) Evolution de l'urbanisation d'un quartier d'Orléans

Dans le cadre d'un stage de géomatique, A. Thibault (M2 OSUC, 2015) a retracé l'évolution de l'urbanisation d'un quartier d'Orléans Est en s'appuyant sur le parcellaire actuel qu'il a modifié sur la base de photographies aériennes prises depuis 1922. Cela lui a permis de qualifier et de quantifier les surfaces en fonction de leur perméabilité et de retracer l'évolution de cette perméabilité sur 80 ans, en repérant les accélérations dans l'imperméabilisation des surfaces liées à des périodes d'intense urbanisation (1960 et 1990).

b) Dynamique des polluants sur le temps court - Observation

Dans le cadre du stage de M2 de M. Réty, nous avons étudié la dynamique temporelle des polluants émergents en amont d'une station d'épuration d'Orléans par la mesure de drogues et médicaments (30 substances) dans les eaux usées, sur 85 jours consécutifs[159]. L'objectif était de déterminer les facteurs de contrôle de la dynamique de ces composés sur des échelles journalières et hebdomadaires. Le jeu de données produit (concentrations), ramené en unités qui autorisent des comparaisons avec les études antérieures (flux, flux par équivalent habitant, consommation), et corrigé des facteurs d'excrétion et de partitionnement dissout/particulaire a permis les conclusions suivantes (Figure 39) :

- (1) les flux mesurés pour le quartier considéré sont dans les ordres de grandeur d'autres études. Quelques disparités sont tout de même notées pour les anti-inflamatoires (préférence du kétoprofène au lieu de l'ibuprofène, surconsommation du tétrahydrocannabinol aux dépends de drogues dures) ;

[159] Réty, M. (2016). Dynamique temporelle des flux de polluants émergents dans les eaux usées en amont de station d'épuration. Cas de la station d'épuration d'Orléans-la-Source. Stage de Master Stratégie et Qualité en Chimie Analytique, Université d'Orléans, 25p.



Figure 39 : Comparaison des charges en médicaments et drogues dans les eaux usées en amont d'une STEP de la région Centre, normalisées à la population (étoiles), avec celles d'autres bassins versants issues de la littérature (Thiebault et al., 2017).

- (2) Des différences notables dans les rythmes de consommation sont repérées (Figure 40). Alors que certains composés semblent être invariablement consommés la semaine et le weekend (oxazepam, sulfaméthoxazole, triméthoprime, ibuprofène, diclofénac…), d'autres sont soit préférentiellement consommés durant le weekend (cocaïne et dérivés, ecstasy), soit durant la semaine (kétoprofène, méthadone, métoprolol) ; (3) cette étude permet également de discuter les stabilités relatives des composés lors de leur transfert. Par exemple, le rapport entre sulfaméthoxazole et triméthoprime, substances co-consommées, est défini à 5/1 dans les comprimés. Il est de 7.5/1 dans nos échantillons, ce qui indique une plus grande stabilité du sulfaméthoxazole par rapport au triméthoprime lors du transfert. Ces travaux, présentés lors de plusieurs congrès[160,161,162], ont fait l'objet d'une publication en 2017[163].

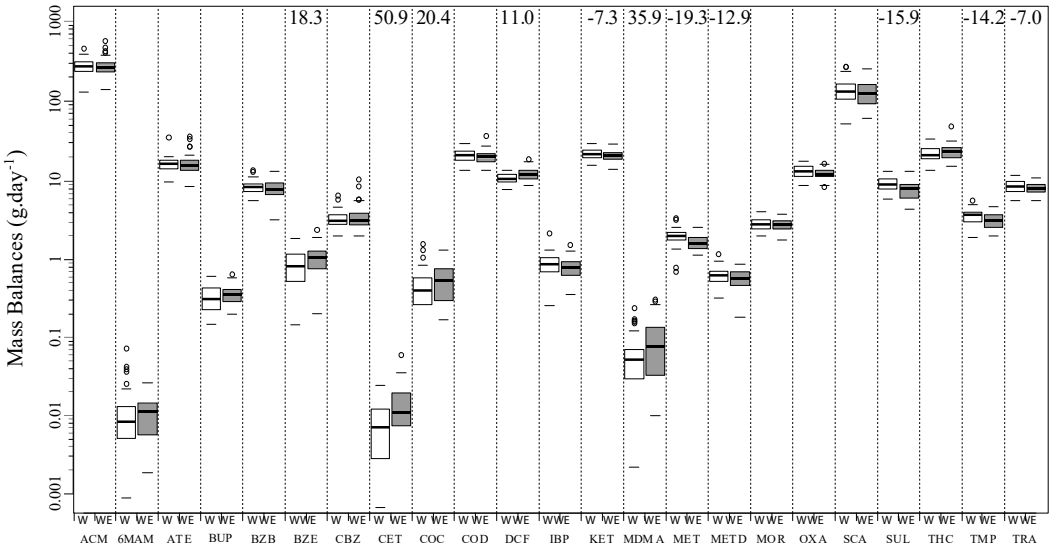


Figure 40 : Comparaison semaine (blocs blancs) / week-end (blocs gris) des flux journaliers de drogues et médicaments dans les eaux usées en amont d'une station d'épuration (Thiebault et al., 2017).

[160] Réty, M., **Jacob, J.**, Le Milbeau, C., Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2016. Quels contrôles agissent sur la variabilité temporelle des polluants organiques dans les eaux usées ? Cas de la station d'épuration de La source (Loiret, France). 3ème réunion des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique, Poitiers, 7-8 juillet 2016.

[161] Réty, M., **Jacob, J.**, Thiebault, T., Le Milbeau, C., Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2016. Evolution quotidienne des flux de contaminants émergents dans les eaux usées en amont de la station d'épuration de La Source (Orléans, France). Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

[162] Thiebault, T., Réty, M., **Jacob, J.**, Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2017. Daily dynamics of emerging pollutants in a sewer network (région Centre, France). EGU, Vienne, 23-28 avril 2017.

[163] Thiebaut, T., Fougère, L., Destandau, L., Réty, M., **Jacob, J.**, 2017. Temporal trends in the occurrence of human-excreted pollutants in wastewater treatment plant influents: toward a better knowledge of mass loads fluctuation. Science of the Total Environment, 596-597, 246-255.

c) Archivabilité du message sédimentaire

L'étude comparée des sédiments de deux lacs urbains orléanais (Lac de l'Orée de Sologne et Lac de l'Université) réalisée dans le cadre du stage de M. Priou (M1 OSUC, 2014) nous a permis de tester l'application des biomarqueurs moléculaires en contexte urbain. Les cortèges moléculaires inventoriés sont très similaires à ceux auxquels nous sommes confrontés dans les archives naturelles, avec abondance de triterpènes pentacycliques relativement spécifiques de leurs plantes sources. Nous avons également identifié de nouvelles séries de dérivés diagénétiques de triterpènes pentacycliques qui apportent un éclairage nouveau sur les voies diagénétiques de ces composés. Enfin, nous avons pu démontrer que les cortèges moléculaires distincts dans les deux lacs étaient représentatifs des communautés végétales environnantes, ce qui indique que les sédiments de ces lacs urbains sont bien le reflet de contextes locaux[164,165]. Leur étude permet donc de renseigner les hétérogénéités spatiales de distribution de la biodiversité en milieu urbain.

d) Construction de l'archive – Rétro-observation temps intermédiaire

Nous avons bénéficié des travaux de rénovation de la chambre à sable de l'agglomération orléanaise pour mettre en œuvre une première étude de faisabilité sur l'intérêt d'archives sédimentaires dans les réseaux d'assainissement pour reconstituer la trajectoire du socio-écosystème Ville. Il s'agit d'un bassin de décantation en aval du réseau d'assainissement et en amont des stations d'épuration, qui collecte les eaux usées et eaux pluviales (réseau unitaire) du nord de l'agglomération d'Orléans. Cet ouvrage de 17 m de profondeur (Figure 41), construit en 1942, n'avait, semble-t-il, jamais été curé avant le printemps 2015. Il arrivait ainsi à saturation en sédiments, ce qui laissait augurer des résolutions temporelles de l'archive sédimentaire rarement atteintes pour des équivalents naturels.

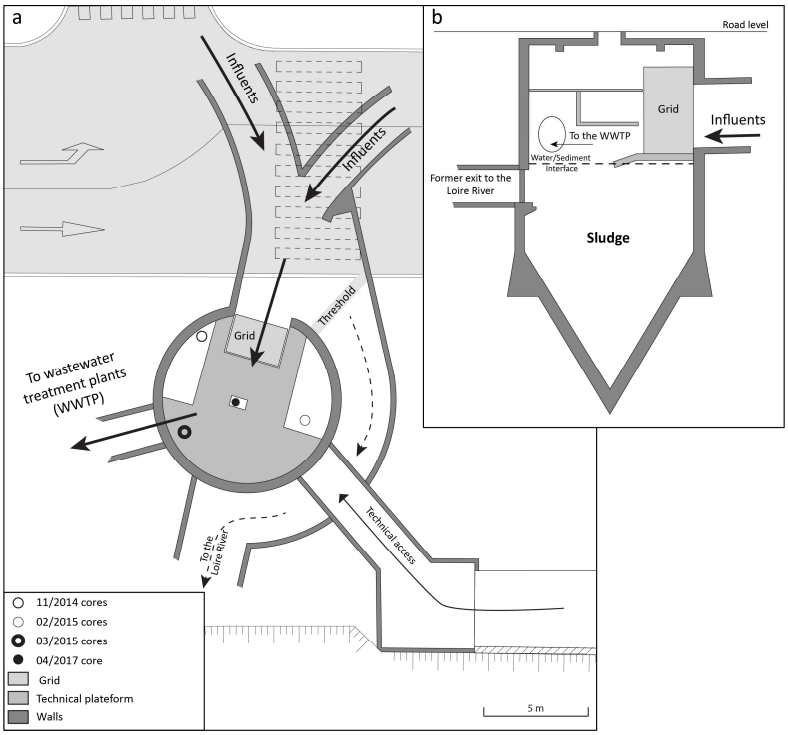


Figure 41 : La chambre à sable d'Orléans. A) Plans de masse avec localisation des apports du réseau unitaire, de la sortie des eaux grises vers les stations d'épuration, de la dérivation vers la Loire pour les évènements de fortes pluies, l'accès à la plateforme technique, et la localisation des carottes prélevées au cours des différentes campagnes; b) vue en coupe de la chambre à sable.

[164] Priou, M., **Jacob, J.**, Le Milbeau, C., 2014. Analyse comparée des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments de deux lacs urbains artificiels d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.
[165] Le Milbeau, C., **Jacob, J**., 2016. Origine, état de préservation et potentiel d'archivage de la matière organique préservée dans les sédiments de deux lacs urbains artificiels d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

Après l'opération de curage initiale réalisée en 2015 (Figure 42), nous avons systématiquement carotté la chambre à sable avant les opérations de curage postérieures de manière à obtenir les sédiments déposés dans les 6 derniers mois à un an d'activité de la chambre à sable. L'évolution du niveau de sable, repéré par relevé bathymétrique depuis 2014, est indiquée sur la Figure 42. Au total, nous disposons de 35 carottes sédimentaires, depuis les carottes réalisées en amont et pendant le curage de 2015 (campagnes du 13/11/2014, du 24/02/2015, du 24/04/2015; voir plus bas), jusqu'aux dernières carottes prélevées en mars 2018 (campagnes du 18/03/2016, du 11/07/2016, du 14/09/2016, du 01/04/2017, du 26/09/2017 et du 23/03/2018).

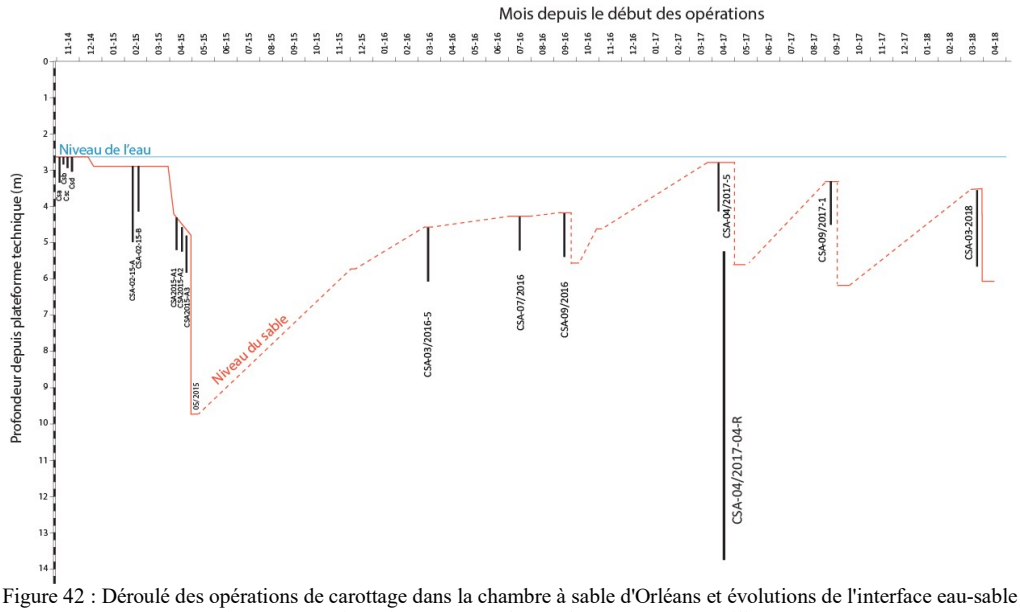


Figure 42 : Déroulé des opérations de carottage dans la chambre à sable d'Orléans et évolutions de l'interface eau-sable suite aux opérations de curage. Seules quelques carottes sont illustrées.

La carotte CSA-03/2016-5 est celle sur laquelle nous avons particulièrement porté notre attention. Prélevée au printemps 2016, elle mesure 1,49 m de long. Nous bénéficions de 6 analyses radioéléments (dont ^{7}Be), 37 analyses granulométriques, Rock-Eval, teneurs en médicaments et drogues, comptage de microbilles et teneurs en acides biliaires. Ces résultats nous ont permis de discuter de la mise en place des sédiments dans la chambre à sable et de l'origine des faciès sédimentaires.

Deux faciès principaux sont distinguables : un faciès organique (COT entre 5 et 15 %) dans la moitié inférieure et un faciès minéral, constitué de sables et graviers, dans la moitié supérieure (Figure 43). Le ^{7}Be indique que les sédiments minéraux datent de moins de 6 mois. La partie inférieure est également caractérisée par de fortes concentrations en acides biliaires alors que la partie supérieure contient de nombreuses microbilles qui proviennent des marquages au sol des routes. Ainsi, la sédimentation semble être contrôlée par les apports respectifs en eaux usées (faciès organiques) et eaux pluviales (faciès minéraux grossiers).

CSA-03/2016-5

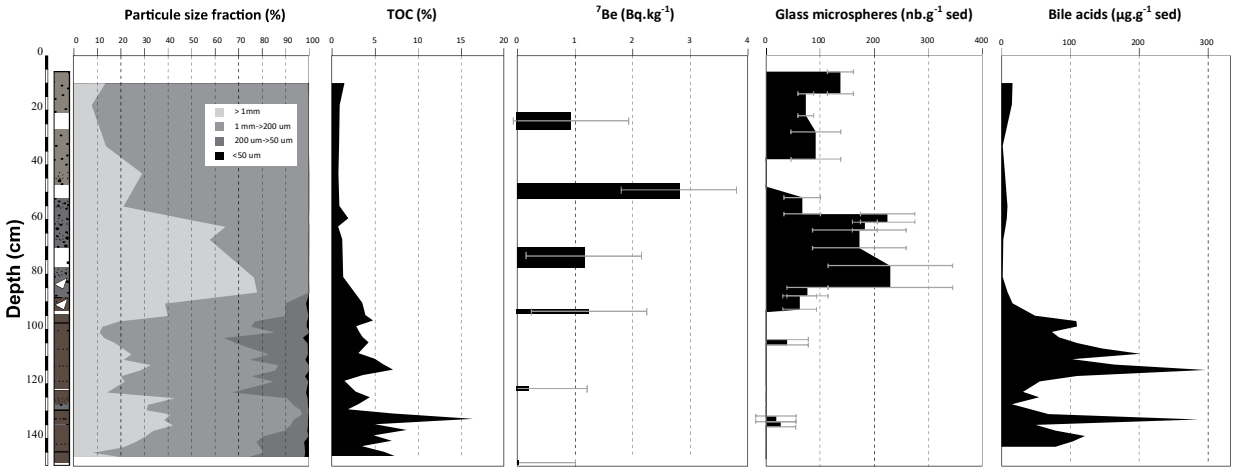


Figure 43 : Evolution de la granulométrie, du Carbone Organique Total (%), du 7Be, de microbilles de verre et des acides biliaires dans la carotte CSA-03/2016-5.

Lorsque l'évolution de la granulométrie est comparée à l'évolution des précipitations et des débits en amont de la chambre à sable des informations supplémentaires sont obtenues sur les contrôles agissant sur la sédimentation. Les débits, stables aux alentours de 30000 m^3/j par temps sec, augmentent considérablement lors d'épisodes pluvieux pour dépasser les 80000 m^3/j. Les repères chronologiques utilisés pour construire la Figure 44 sont les suivants :

- les dates de carottage constituent la borne supérieure.
- la moitié supérieure de la carotte CSA-03/2016-5 correspond à 6 mois avant mars 2016 (^{7}Be), soit environ septembre 2015, le reste étant déposé antérieurement,

L'évolution des débits montre une période relativement calme entre avril et juillet 2015 qui correspond à une période de faibles précipitations. Elle est suivie par une période marquée par de forts épisodes pluvieux jusqu'à novembre 2015. Ensuite, jusque mars 2016, les précipitations sont encore abondantes mais moins fortes. La correspondance entre l'évolution des débits et précipitations sur la période considérée et l'évolution de la granulométrie dans la carotte CSA-03/2016-5 semble valider nos observations sur l'origine des faciès. En période de faibles précipitations, le sédiment résulte principalement d'apports organiques provenant des eaux usées. En période de fortes précipitations, la sédimentation est davantage minérale et contient d'autant plus d'éléments grossiers que les précipitations sont intenses. Ainsi, il doit être possible de préciser le modèle d'âge en repérant des épisodes de fortes précipitations caractérisés par des dépôts grossiers. Toutefois, il faut garder à l'esprit la nature évènementielle des apports ainsi que la possibilité de hiatus par érosion ou non-dépôt, voire des remaniements.

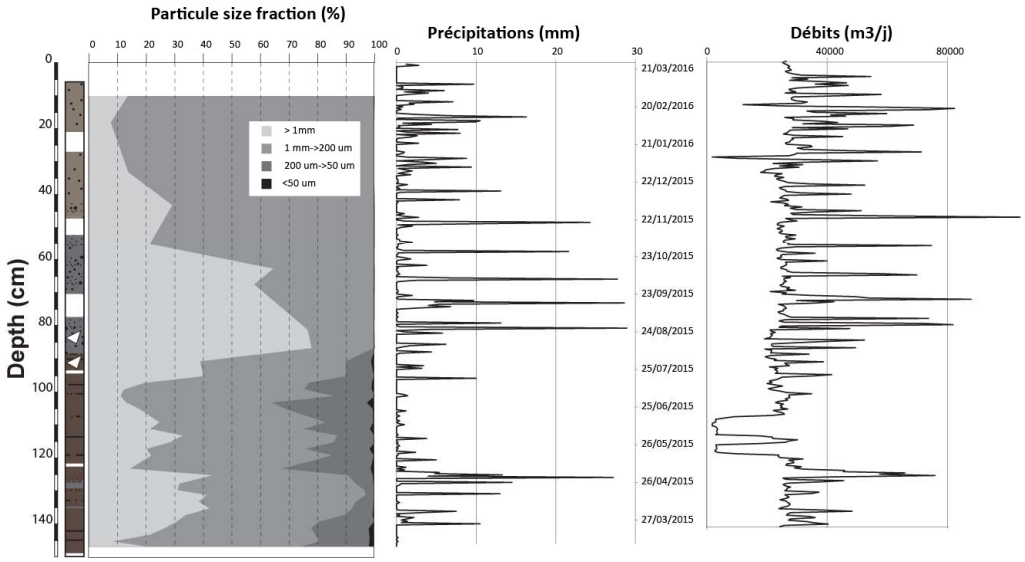


Figure 44 : Comparaison entre l'évolution de la granulométrie dans la carotte CSA-03/2016-5 avec l'évolution des débits dans le réseau d'assainissement et des précipitations sur la période 03/2015 –> 03/2016.

Ces premiers résultats, qui sont précurseurs sur la signification des faciès dans une carotte sédimentaire prélevée dans un bassin de décantation d'un réseau d'assainissement, ont déjà fait l'objet de nombreuses communications lors de congrès[166,167,168]. Un article est en préparation pour Anthropocene[169]. Une partie des résultats a été acquise par des étudiants de Master 2 de l'OSUC dans le cadre de travaux pratiques du module "Archives et Marqueurs", dans le cadre d'un stage de recherche Master 2[170] et d'un travail encadré de recherche de Master 1[171]. La dynamique des biomarqueurs provenant des transports semble plus complexe. Dans le cadre de son travail encadré de recherche de Master 1[172], A. Diacre a identifié de l'onocérane I et un dérivé dans les sédiments de la Chambre à Sable. Elle a pu en identifier la source : les enrobés bitumineux qui tapissent les routes et trottoirs. A noter que ces composés sont, de manière surprenante, plus abondants dans les faciès organiques que dans les faciès minéraux. Les sédiments de la Chambre à Sable contiennent également des hopanes d'origine pétrolière, présents dans tous les faciès, ainsi que des HAP. Ceux-ci sont plutôt d'origine pétrolière dans les faciès minéraux et proviennent de combustions dans les faciès organiques. Enfin, les n-alcanes présentent une distribution typique de végétaux vasculaires dans les faciès organiques alors qu'ils apparaissent altérés, avec des Carbon Preference Index faibles dans les faciès minéraux. Ces travaux feront l'objet d'une note à Organic Geochemistry à la suite de l'article dans Anthropocene.

e) Evolution de la ville d'Orléans sur plusieurs décennies – Rétro-observation temps long

Forts de ces éléments de compréhension de la sédimentation dans la chambre à sable d'Orléans, nous avons souhaité explorer le temps qui, dans ce contexte, correspond à plusieurs décennies. Pour

[166] Thibault, A., **Jacob, J.**, Simonneau, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2016. Sédimentologie, stratigraphie et chronologie du remplissage d'un bassin de décantation du réseau d'assainissement de l'agglomération d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

[167] Thibault, A., **Jacob, J**., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Motelica, M., Thiebault, T., Di Giovanni, C., 2015. Quels marqueurs du métabolisme urbain recèlent les accumulations sédimentaires dans les réseaux d'assainissement ? Cas de l'agglomération orléanaise. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

[168] **Jacob, J.**, Simonneau, A., Thibault, A., Thiebault, T., Diacre, A., Le Milbeau, C., Boscardin, R., DiGiovanni, C., Fougère, L., Destandau, E., Morio, C., 2018. Archivage sédimentaire dans le réseau d'assainissement unitaire d'Orléans : une simple question de contributions respectives eaux usées / eaux pluviales ? 26ème Réunion des Sciences de la Terre, Lille, 22-26 octobre 2018.

[169] **Jacob, J.**, Thibault, A., Simonneau, A., Sabatier, P., Le Milbeau, C., Ardito, L., Morio, C., DiGiovanni, C. Meteorological and anthropic controls on sediment accumulation in a decantation tank collecting a unitary sewer network (Orléans, France). En préparation pour Anthropocene.

[170] Thibault, A., 2015. Analyse multiproxy d'une carotte de sédiments prélevée dans le réseau d'assainissement de l'AgglO. Stage de recherche M2 "Hydro-Env". OSUC.

[171] Rémy, F., 2017. Etude comparative des dépôts sédimentaires sur une série de carottes effectuées dans un bassin sédimentaire anthropique inscrit dans le cadre du projet Golden Spike. Travaux Encadrés de Recherche M1. OSUC.

[172] Diacre, A., 2018. Nature et origine des polluants provenant des transports dans une archive sédimentaire anthropique – cas des sédiments de la chambre à sable d'Orléans. Travail encadré de recherche M1. OSUC.

cela, nous avons travaillé sur plusieurs jeux de carottes. La carotte CSA-11/2014-A (70 cm) a été prélevée en novembre 2014 avant les opérations de curage, en enfonçant depuis la plateforme technique un tube PVC dans le sédiment émergé. Les carottes CSA-02/2015-A (2,6 m) et CSA-02/2015-B (1,38 m) ont été prélevées par carottier gravitaire en février 2015. Les carottes CSA-03/2015-A1, -A2 et -A3 ont été prélevées durant les opérations de curage, en avril 2015, alors que près de 2 m avaient déjà été curés et qu'il était possible d'accéder aux sables. Trois tubes PVC ont été enfoncés directement dans le sédiment. La chambre à sable, remise en activité après curage d'environ 2,5 m de sédiments, a conservé environ 4 m de sédiments les plus profonds. Nous les avons atteints lors des opérations de carottage de 2017 avec le concours du Centre de Carottage et de Forage National (C2FN) au moyen d'une Sedidrill et d'un carottier russe (carotte CSA-04/2017-04R). Sur ces différentes carottes nous disposons de 49 dates ^{14}C et de quelques mesures radioéléments (travail en cours).

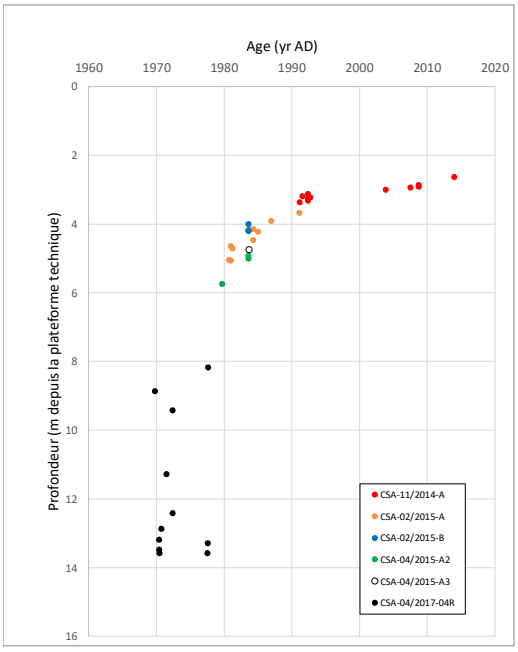


Figure 45 : Synthèse des datations ^{14}C obtenues dans les sédiments de la chambre à sable d'Orléans. Calibration avec Clam en mode Postbomb.

L'échantillon le plus haut dans la série est fixé à 2014 dans la Figure 45. Les échantillons les plus bas, obtenus lors de la campagne de 2017, affichent deux populations d'âge à 1970 et 1978, bien loin de 1942, date espérée pour les sédiments les plus profonds. Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer ces âges relativement jeunes : (1) un curage réalisé dans les années 1980. Si des travaux ont effectivement été réalisés à cette période, nous n'avons pas trouvé trace de curage. Pourtant, une photo fournie par les archives municipales et communautaires d'Orléans datant de 1962 laisse à penser que de telles opérations ont eu lieu par le passé; (2) un remaniement des sédiments anciens lors de la remise en eau après le curage d'avril 2015. Cela expliquerait que l'ensemble des dates de la carotte CSA-04/2017-04R est centré autour de 1970/1978, mais cela n'explique pas l'absence de matériel plus ancien. Par ailleurs, il est surprenant que les âges obtenus dans des sédiments de cette carotte à une altitude plus élevée que le niveau de sédiment post curage (entre 8 et 10m) soient aussi dans cette gamme alors qu'ils devraient en toute rigueur être postérieurs à 2015; (3) des remaniements pendant les opérations de carottage d'avril 2017. En effet, nous n'avons pu bénéficier que d'une fenêtre réduite (30 cm x 30 cm) dans la plateforme en béton depuis la surface. Nous avons dû tester de nombreux carottiers avant d'obtenir une série sédimentaire avec le carottier russe, ce qui a pu perturber le sédiment. D'ailleurs, les sédiments de cette carotte ne montrent pas d'organisation stratigraphique claire. Malgré les questions qui subsistent sur les sédiments les plus profonds, les âges ^{14}C s'enchaînent remarquablement avec la profondeur, laissant imaginer des taux de sédimentation élevés dans la partie profonde de la Chambre à Sable et des taux de sédimentation très réduits dans la partie supérieure. Cela s'explique

par le fait que la Chambre à Sable arrivait à saturation et n'accomodait plus de sédiments avant les aménagements opérés par l'AgglO. Au total, nous disposons d'un enregistrement couvrant environ 40 ans de l'histoire d'Orléans. La sédimentologie, la stratigraphie et l'application du ^{14}C postbomb sur cette série sédimentaire ont fait l'objet de plusieurs communications à congrès[173],[174],[175]. Une publication sur le sujet sera soumise à Radiocarbon[176] à la suite de la première publication dans Anthropocene.

Sur la carotte CSA-02/2015-A qui enregistre la durée la plus longue, nous avons également réalisé 90 analyses granulométriques, Rock-Eval, et détermination des concentrations de 40 drogues et médicaments. Quelques exemples d'évolution des concentrations en médicaments et drogues sont fournis en fonction de la profondeur en Figure 46. Ces résultats sont en cours d'exploitation et demandent à être replacés en fonction de l'âge quand le modèle d'âge sera finalisé. Toutefois, de nettes tendances se dessinent, notamment en ce qui concerne les apparitions de certains composés dont il faudra comparer la date avec les dates de mise sur le marché. Ces travaux seront soumis pour publication à la suite du précédent dans Anthropocene[177].

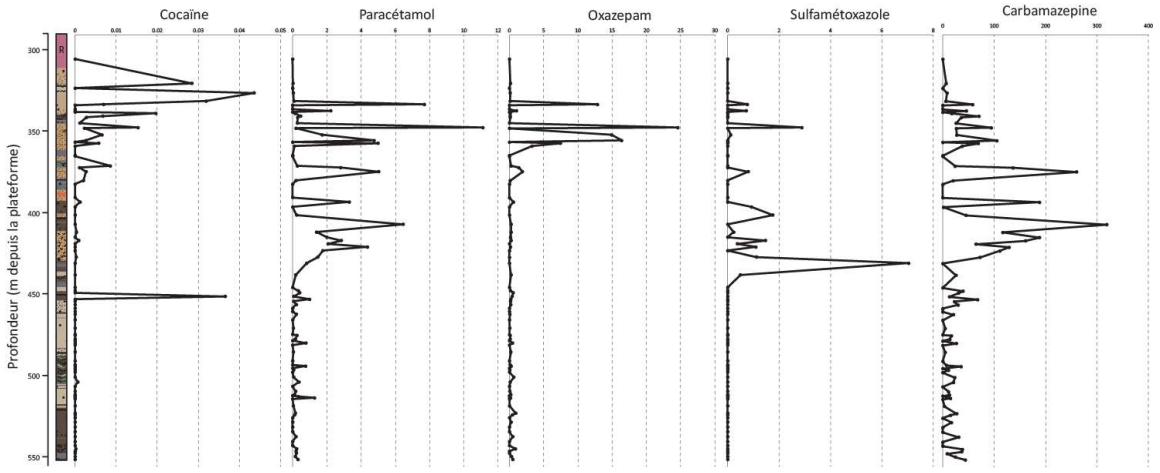


Figure 46 : Evolution des concentrations (en ng/g sédiment) de quelques médicaments et drogues en fonction de la profondeur dans la carotte CSA-02/2015-A.

La présence ou la concentration des drogues et médicaments est bien entendu très dépendante du faciès et de la présence de phases porteuses qui assurent l'archivabilité des composés organiques. Une première étude statistique menée par T. Thiébault indique que les composés cationiques sont davantage retrouvés dans les sédiments affichant des Indices d'Oxygène et des Tmax élevés, les composés anioniques dans les sédiments à granulométrie fine et les composés neutres dans les sédiments riches en matière organique. Ces observations, nourries par l'ensemble des données (200 !) Rock-Eval, granulométrie et concentrations en drogues et médicaments, seront soumises pour publication dans un second temps à Science of the Total Environment.

Au total, les premiers résultats acquis dans le cadre du projet Golden Spike montrent (1) une très grande diversité de traceurs potentiels : éléments figurés, médicaments, produits cosmétiques,

[173] Thibault, A., **Jacob, J**., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2017. Sedimentology, stratigraphy and chronology of a decantation tank in the sewer network of Orléans (France). EGU, Vienne, 23-28 avril 2017.
[174] Thibault, A., **Jacob, J.**, Simonneau, A., Le Milbeau, C., Motelica, M., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., 2015. Signification temporelle des accumulations sédimentaires dans le réseau d'assainissement de l'agglomération d'Orléans - Approches sédimentologique et géochronologique. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.
[175] **Jacob, J.**, Simonneau, A., Thibault, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2016. Chronologie du dépôt de sédiments dans un bassin de décantation du réseau d'assainissement d'Orléans. Journée Thématique REFRAIN – ^{14}C. 21 novembre 2016, Orsay.
[176] **Jacob, J.**, Thibault, A., Simonneau, A., Hatté, C., Le Milbeau, C., Sabatier, P., Ardito, L., Augustin, L., Lefèvre, I., Morio, C., Di Giovanni, C. Lithology, stratigraphy and dating of anthropic sediments accumulated in a decantation tank in the unitary sewer network of Orléans (France). Radiocarbon
[177] **Jacob, J.**, Thibault, A., Fougère, L., Thibault, A., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Ardito, L., Augustin, L., Destandau, E., Di Giovanni, C. Evolution of licit and illicit drugs since 1980 from a sedimentary archive in the sewer network of Orléans (France). En préparation pour Anthropocene.

microbilles, stérols, HAP et autres hydrocarbures provenant de la chaussée, des carburants et huiles ou des combustions, métaux lourds qui témoignent des diverses activités humaines (la santé, l'environnement, les transports, l'alimentation…) ; (2) une logique temporelle de remplissage sédimentaire depuis au moins les années 1980 appuyé par des dates ^{14}C en mode postbomb ; (3) une alternance de faciès expliqués par les apports réciproques eaux usées/eaux pluviales. La sédimentation apparaît épisodique et constituée d'une succession d'érosions et de dépôts, sans remaniements notables. L'ensemble de ces éléments valide les hypothèses initiales et est de bon augure pour les perspectives évoquées plus loin.

f) Valorisation/vulgarisation

A peine entamé, ce projet bénéficiait d'une large couverture médiatique qui s'explique largement par son caractère novateur et original. La presse locale s'est fait l'écho de nos recherches[178,179,180] et le CNRS Image a fait un reportage photographique lors d'une campagne de carottage. Ce reportage a été publié dans le Journal du CNRS en ligne[181] et a occupé 6 pages de l'édition de printemps 2017 du Journal du CNRS papier.

g) Perspectives

i. A Orléans – Projet Golden Spike

L'urgence est de valoriser les résultats obtenus selon la stratégie de publication déclarée plus haut. Considérant la qualité et la quantité d'échantillons et de données disponibles, une large gamme de traceurs peut être explorée dans les fractions organiques qui n'ont pas totalement été exploitées (biomarqueurs moléculaires "naturels", plastiques et plastifiants, autres médicaments et drogues, pesticides, produits cosmétiques et de bien-être). Notre priorité est de ré-analyser les extraits de la carotte CSA-02/2015-A pour retracer l'évolution de 8 médicaments et drogues mis dont nous venons d'acquérir les standards. En parallèle, nous mesurons avec I. Lefèvre (LSCE) les radioéléments sur cette même carotte pour percevoir l'accident de Tchernobyl. Tout un champ de recherche reste également en chantier sur les éléments trace métalliques, les platinoïdes et la minéralogie de sédiments.

Le chantier le plus excitant qui a démarré est réalisé en collaboration avec C. Robin, L. Mollet et F. Brûlé (Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans), T. Prazuck et L. Hocqueloux (CHRO). A l'instar de ce qui se développe en paléo avec l'ADN environnemental, et inspiré par les travaux de wastewater-based epidemiology fondés sur l'ADN (voir plus haut), l'objectif est d'identifier dans les eaux et sédiments de l'ADN pouvant témoigner de bactéries et virus pathogènes sévissant ou ayant sévi dans le bassin versant. Nos premiers travaux ont visé à rechercher le meilleur mode opératoire pour extraire l'ADN de ces deux matrices. Cette étape est réalisée. La prochaine étape, qui démarrera début 2019, aura pour objectif de quantifier l'ADN de quelques pathogènes (en particulier des maladies intestinales) dans les extraits d'eaux et de sédiments, au moyen d'amorces dédiées et par ddPCR. Enfin, nous procèderons à l'analyse de l'ensemble des sédiments de la carotte CSA-02/2015-A de manière à reconstruire la chronique de ces maladies depuis les années 1980. Ici également, le vaste champ des possibles permis par l'ADN autorise d'imaginer tout un pan de recherche qui va au-delà des questions de santé.

Au total, si les études sur la Chambre à Sable d'Orléans ont permis de faire la démonstration de la faisabilité puis de l'intérêt de la transposition des approches environnementales au milieu urbain, elles ont surtout ouvert de nombreuses questions et de larges perspectives. Maintenant que la sédimentologie et la chronologie sont assez bien établies, il reste à exploiter la vaste diversité des traceurs archivés. La question du raccord des temporalités, entre le quotidien et l'archive sédimentaire demeure, elle, inachevée.

[178] Quand les égouts d'Orléans racontent notre histoire. Reportage France Bleu Orléans, 05/12/2016.
[179] Secrets d'histoire à travers les égouts. Article dans La République du Centre, 20/01/2016.
[180] Reportage France 3 Centre Val de Loire du 10/10/2015.
[181] L'étonnante mémoire des eaux usées. Journal du CNRS en ligne, 16/11/2016.

ii. A Paris dans le cadre d'OPUR

Les résultats obtenus à Orléans sont-ils transposables à d'autres villes ? L'idée initiale était d'étudier des ouvrages similaires à la Chambre à Sable dans d'autres villes. Il semble que cet ouvrage soit unique et que peu de villes disposent de bassin de décantation qui n'ont pas été curés sur une longue période. Le risque majeur pour appliquer une telle démarche dans d'autres villes est donc lié à la disponibilité d'archives sédimentaires comparables. Par ailleurs, l'ambition de raccorder les temporalités oblige à établir des moyens d'observation des flux de matière (en particulier de micropolluants) qui peuvent être lourds à mettre en œuvre et à maintenir. De tels moyens d'observation existent ou sont en cours de développement dans les Observatoires d'Hydrologie Urbaine du réseau Urbis : Lyon (OTHU), Nantes (ONEVU), et Paris (OPUR). J'ai donc pris contact avec G. Chebbo (LEESU), directeur d'OPUR pour lui faire part de mon projet et envisager que la rétro-observation par l'étude des sédiments soit envisagée. Des discussions sont en cours sur la phase V d'OPUR. Au sein des divers projets mis en avant en partenariat avec les partenaires (SIAP, Ville de Paris, CD92, etc…), un groupe de travail conduit par R. Moilleron envisage de créer un observatoire géochimique pérenne des flux de micropolluants qui constituerait également un observatoire des pratiques au sein duquel des actions de sciences participatives pourraient être envisagées. En parallèle, j'ai pris contact avec le Service Technique de l'Eau et de l'Assainissement de la Ville de Paris pour leur présenter mon projet et pouvoir visiter les installations à la recherche d'archives sédimentaires potentielles. S'il semble difficile d'imaginer accéder à des enregistrements comparables à la Chambre à Sable, l'Ile de France dispose d'une multitude d'ouvrages dans lesquelles des accumulations sur plusieurs années sont possibles. Un projet sera proposé à un guichet régional, national (ANR) ou européen lorsque j'aurai une vision plus précise des possibilités de recherche sur Paris.

iii. A l'échelle des métropoles Européennes

La prochaine étape de ce projet aura pour objectif de réaliser une comparaison chronologique des matières au cours des dernières décennies dans plusieurs métropoles européennes. Des contacts ont été pris en 2016 avec des laboratoires français (CITERES, Tours), anglais (OGU, Bristol et University of the West England), italiens (Université de Sannio), et norvégiens (Geological Survey of Norway, NTNU) pour envisager la soumission d'un projet ERA-NET Cofund Smart Urban Futures (ENSUF). Malgré l'accueil très positif des collègues, le projet n'a finalement pas été soumis, en particulier du fait des délais et du mode de financement (50% de co-financement à trouver).

iv. Accumulations sédimentaires de l'anthropocène hors réseau d'assainissement

Pour les raisons invoquées plus haut, mon projet s'intéresse principalement aux accumulations sédimentaires en contexte urbain. Néanmoins, d'autres archives géologiques en milieu urbain, péri-urbain ou rural doivent également pouvoir être explorées de manière à retracer l'évolution du socio-écosystème ville, ou plus largement les activités humaines durant l'Anthropocène.

L'actualité est le financement, à partir de 2018, du projet ANR "HUNIWERS - Historical impact of urbanization on water quality, a diachronic study in Paris and surrounding areas" financée en 2018, porté par E. Pons-Branchu et dans lequel je suis impliqué. Edwige est l'une des seules en France à développer des recherches sur les paléopollutions en contexte urbain en France, avec peut-être S. Rousse (GET, Toulouse). Le projet HUNIWERS propose une approche innovante de reconstruction de l'évolution historique de la qualité de l'eau par l'étude de spéléothèmes (croûtes de calcaires secondaires) développés dans des galeries et aqueducs utilisés pour drainer l'eau des aquifères perchés au sud et au nord de Paris et qui ont longtemps servi de ressources en eaux pour les parisiens. Ces spéléothèmes se développent sous l'influence de l'eau provenant des précipitations ayant traversé les sols ou de fuites du réseau d'assainissement.

La créativité et les activités humaines fournissent de nombreuses autres archives d'intérêt potentiel pour mon projet. Colin Waters[182] propose, parmi d'autres, que le GSSP de l'Anthropocène soit défini dans la décharge de Fresh Kills sur Staten Island, dans laquelle 26 000 tonnes de déchets sont accumulés depuis 1948. En France, deux sites sont potentiellement d'intérêt parce que suffisamment anciens et possiblement encore stratifiés: (1) la décharge littorale de Dollemard[183,184,185,186] et (2) la paléodécharge de la Colline aux Oiseaux à Caen qui résulte de l'accumulation sur 20 mètres des déchets accumulés entre 1923 et 1973 (Figure 47)[187].

"Une société est à l'image des déchets qu'elle se crée" - Jean Gouhier, géographe et rudologue



Figure 47 : La Colline aux Oiseaux à Caen (dans les années 1970 –a- et après transformation en parc public en 1994) et sa Caverne à Déchets (c, d). Crédits photos : a, b, c, d.

h) One step beyond[188]

Quels traceurs pour tracer quels processus ? Comme indiqué plus haut, le terrain de jeu urbain laisse imaginer une multitude de traceurs témoignant de processus, d'activités, de pratiques variées, et donc de nouveaux champs de recherche qu'il pourrait être pertinent de défricher. Quels peuvent être les futurs territoires d'innovation et ceux qui engagent à plus d'inter-d'indisciplinarité ? Dans le cadre de mon cours sur l'anthropisation dans le module "Climats et Paléoclimats" de l'OSUC dispensé aux M2, j'ai provoqué la curiosité des étudiants sur ce qu'ils pourraient imaginer comme nouveaux marqueurs ou nouveaux processus qu'il faudrait rechercher dans les archives sédimentaires. Au-delà des éléménts assez classiques qu'ils ont pu proposer, quelques pépites semblent particulièrement innovantes : (1) des traceurs de religions et de croyances; (2) des traceurs d'informations; (3) des traceurs du bruit; (4) des traceurs des sentiments.

"Toute connaissance commence par des sentiments" - L. de Vinci

[182] Barras, C., 2018. The best place on Earth to mark Anthropocene's dawn. BBC, 6 février 2018.
[183] https://www.gardiensdelacote.com/decharge-dollemard/
[184] http://eplh.free.fr/dollemard/
[185] https://oceanplastictracker.com/tracers/88188e86-7f04-4c34-ab3c-3e396ef0f28f
[186] https://lesjours.fr/obsessions/trash-investigation/ep2-decharges/
[187] http://www.ina.fr/video/CAF93027242/caen-ordures-video.html (Inscription au site de l'INA requise).
[188] Madness, 1979.

III. **Vers une approche sensorielle en géochimie organique**

1. Introduction



Figure 48 : "Profession Géologue". La République du Centre du 10 juillet 1980. Source : Archives Départementales du Loiret.

La géochimie organique est une discipline très fortement ancrée dans la technique (GC-MS, GC-irMS, Py-GC-MS, RMN…) car les objets d'étude, les biomarqueurs moléculaires, sont complexes, peu concrets, puisque trop petits pour être vus ou touchés, ce qui les rend peu immédiats, difficiles à appréhender. La technicité de leur analyse et le caractère insaisissable des matières et molécules organiques peut être un frein à la médiation, notamment pour expliquer nos objets aux collègues d'autres disciplines pour nouer des collaborations ou pour enseigner la géochimie organique et, plus généralement, au dialogue Sciences/Société. Pourtant, la géochimie organique est une discipline naturaliste et très descriptive. Bien qu'elle s'intéresse aux processus, elle est très objet-orientée, tout comme la géologie en général (c'est écrit dans La République du Centre (Figure 48), c'est donc que c'est vrai !).

Dans ce deuxième axe de recherche, plus exploratoire, je propose d'aborder nos questions de recherche et les objets qui permettent de les résoudre par le prisme des sens. Plus qu'un projet de recherche personnel, il s'agit davantage d'un manifeste pour défendre une plus large prise en compte des sens dans nos travaux. Aussi, les pistes de recherche et la stratégie ne sont qu'évoquées à la marge. Charge aux collègues (géochimistes organiciens mais plus largement environnementalistes et paléoenvironnementalistes) qui liront ce manuscrit de s'approprier ces questions.

Je décrirai d'abord quelques initiatives d'approches sensorielles en sciences de l'environnement. Cela permettra de dresser un cadre de faisabilité pour trois pistes de recherche : (1) tenter une description sensorielle de nos objets d'étude ou, plutôt, confronter deux approches : l'une technique et objective, l'autre sensorielle et plus subjective ; (2) décrire les paysages sensoriels actuels; (3) reconstituer les paysages sensoriels passées par la géochimie organique. J'argumenterai finalement sur l'apport d'une telle approche pour promouvoir la géochimie organique auprès d'autres communautés ou du grand public. Dans la mesure du possible, j'illustrerai au moyen des quelques résultats que j'ai pu obtenir à l'occasion de diverses initiatives.

2. Approches sensorielles en sciences de l'environnement

a) L'odorat

Le premier réflexe du géochimiste organicien lorsqu'il dispose d'un extrait lipidique est de le sentir pour éventuellement détecter le soufre qu'il faut retirer de l'extrait avant analyse. Chacun peut être marqué par l'odeur de terre qui se dégage des sols après une pluie qui révèle la fameuse géosmine, produite par des microbes des sols[189,190]. En géochimie organique appliquée à l'archéologie, nombreuses sont les études décrivant la chimie de substances anciennes (encens[191], baumes[192], goudrons de calfatage, enduits, huiles[193], anciennes latrines…) qui laissent imaginer de véritables "paysages olfactifs" (voir le commentaire suite à cet article). Les questions sur les effets

[189] https://theconversation.com/pourquoi-nous-pouvons-sentir-lodeur-de-la-pluie-102222

[190] http://www.nytimes.com/2015/01/27/science/how-the-smell-of-rain-bubbles-from-the-ground.html

[191] Mathe, C., Culioli, C., Archier, P., Vieillescazes, C., 2004. Characterization of archaeological frankincense by gas chromatography–mass spectrometry. Journal of Chromatography A 1023, 277-285.

[192] Buckley, S.A., Clark, K.A. and Evershed, R.P., 2004. Complex organic chemical balms of Pharaonic animal mummies. *Nature* **431**, 294-299.

[193] Kimpe, K., Jacobs, P.A., Waelkens, M., 2001. Analysis of oil used in late Roman oil lamps with different mass spectrometric techniques revealed the presence of predominantly olive oil together with traces of animal fat. Journal of Chromatography A 937, 87-95.

d'une goutte d'eau tombant sur le sol et produisant des aérosols, et donc sur le transfert de molécules volatiles et olfactives, rejoignent celles plus générales du transfert de substances organiques dans les écosystèmes évoquées plus haut.

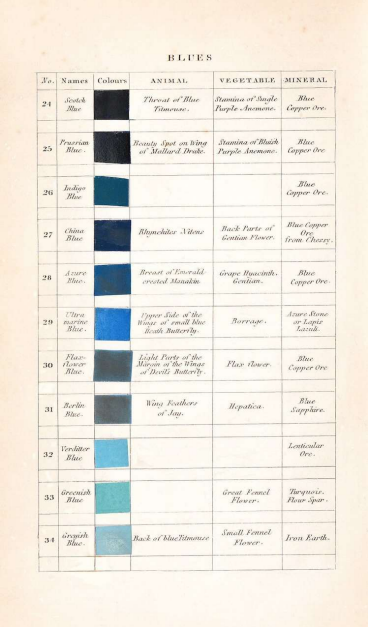
b) Le goût

L'image commune du géologue, la première quasiment enseignée à nos étudiants, est celle du lécheur et du manipulateur de cailloux (voir cette vidéo de @Sciencecomptoir). L'effort du géochimiste pour décrire de manière la plus exhaustive possible la chimie des matières organiques (voir par exemple les travaux de Schulten et Schnitzer en pyrolyse) est très analogue, et symétrique, de celle de certains chercheurs en gastronomie qui tentent de reconstruire la chimie complexe du goût par la juxtaposition de molécules ou matières primaires, ce qu'Hervé This nomme la "cuisine note à note". H. This est d'ailleurs cité dans l'ouvrage de Danièle Alexandre-Bidon, céramologiste, qui développe l'idée d'une archéologie du goût[194], recherchant, sur la base entre-autres des typologies de céramiques, les préférences gustatives au Moyen-Âge. En géochimie organique, il semble difficile d'exploiter le goût pour décrire nos objets, sauf à évoquer l'amertume des grains de millet ou l'amertume particulière des salades telles que la scarole ou la roquette qui pourraient provenir, respectivement, de la miliacine et des acétates de triterpényles.

c) L'ouïe

Les astronomes sondent les bruits des confins de l'univers ou le son du vent sur Mars tandis que de nombreux écologues développent des systèmes d'écoute des plantes, de la biodiversité, des écosystèmes, voire de la planète, les géologues/physiciens enregistrent le chant des dunes, et des artistes traduisent les réactions des plantes à divers stress en messages sonores.

d) La vue


BLUES

No.	Names	Colours	ANIMAL	VEGETABLE	MINERAL
24	Scotch Blue		Throat of Blue Titmouse.	Stamina of Bugle. Purple Anemone.	Blue Copper Ore.
25	Prussian Blue.		Beauty Spot on Wing of Mallard Drake.	Stamina of Bluish Purple Anemone.	Blue Copper Ore.
26	Indigo Blue.				Blue Copper Ore.
27	China Blue.		Rhynchites Nitens.	Back Parts of Gentian Flower.	Blue Copper Ore, from Chessy.
28	Azure Blue.		Breast of Emerald-crested Manakin.	Grape Hyacinth. Gentian.	Blue Copper Ore.
29	Ultramarine Blue.		Upper Side of the Wings of small blue Heath Butterfly.	Borrage.	Azure Stone or Lapis Lazuli.
30	Plain Flower Blue.		Light Parts of the Middle of the Wings of Devil's Butterfly.	Plain Flower.	Blue Copper Ore.
31	Berlin Blue.		Wing Feathers of Jay.	Hepatica.	Blue Sapphire.
32	Verditer Blue.				Lenticular Ore.
33	Greenish Blue.			Great Fennel Flower.	Turquoise. Flour Spar.
34	Greyish Blue.		Back of blue Titmouse.	Small Fennel Flower.	Iron Earth.

Figure 49 : Page extraite de l'ouvrage "Nomenclature of Colours" de Abraham Gottlob Werner, 1814. Source.

i. Les couleurs

Chacun peut apprécier la diversité de couleurs d'un paysage, reflet de la chimie des plantes, des roches et des sols, qui le composent. Au 19ème siècle, Abraham Gottlob Werner avait d'ailleurs produit, en 1814, un ouvrage intitulé "Nomenclature of Colours" pour classer, organiser chaque nuance des mondes animaux, végétaux et minéraux (Figure 49). Ce livre sera ensuite utilisé par Charles Darwin pour décrire les couleurs sur le Beagle. Il a récemment été réédité par le Smithsonian. La couleur est aussi l'un des éléments de caractérisation premier des sols (charte Münsell) pour les pédologues, tout comme la couleur des minéraux pour les minéralogistes. En géochimie organique, l'un des premiers réflexes est d'inspecter la couleur des extraits lipidiques (Figure 50) pour obtenir une première idée de la richesse de l'extrait et de la diversité des échantillons. La transition vers les couleurs de l'automne traduit des réactions chimiques lors de la diagenèse précoce des feuilles, qui fait écho à l'image iconique de la géochimie organique (Figure 24).

[194] Alexandre-Bidon, D., 2005. Une archéologie du goût : céramique et consommation, Moyen Âge-Temps modernes. Picard, Paris 301 p.



Figure 50 : Cinquante nuances d'extraits. Sources : a- @david_naafs; b- ©Cyril Frésillon/CNRS IMAGE; c- @paleoconnor; d- @NemiahLadd; e- @climategordon; f- ©Douglas Levere / University at Buffalo; g- @jeromeblewett; h- @andraejake; i- @NemiahLadd; j- @salincoln; k- @riwi_flashgun

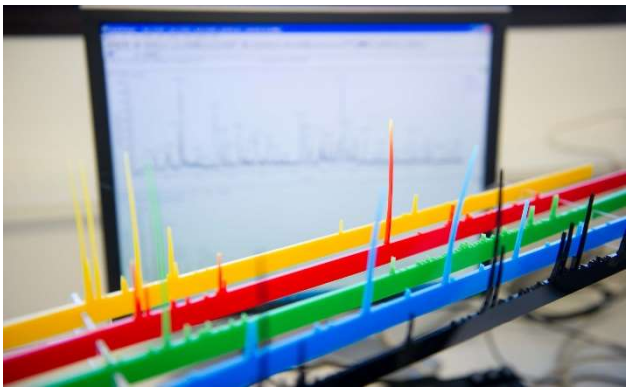


Figure 51 : Chromatogrammes d'ions spécifiques d'une fraction hydrocarbures des sédiments du Lac Caço produits par découpe laser au FabLab Orléanais. ©OSUC - Didier Depoorter

ii. Voir les biomarqueurs

J'ai évoqué plus haut les filtres/biais qui altèrent notre perception des écosystèmes anciens lors de l'étude des archives sédimentaires. L'une des frustrations du géochimiste organicien est de perdre toute information de localisation des biomarqueurs moléculaires lorsqu'il procède à leur extraction des matrices géologiques. Pourtant cette information est essentielle à une meilleure compréhension des mécanismes de transport des biomarqueurs et à une meilleure prise en compte de leur représentativité spatiale et temporelle. Aussi, un réel effort doit être consacré à la localisation, à la visualisation multi-échelle des biomarqueurs. Multi-échelle car il s'agit non seulement de la localisation dans un échantillon (comment les biomarqueurs sont associés aux phases minérales et organiques support ?), mais également à l'échelle du bassin versant et du paysage (comment les biomarqueurs sont-ils distribués, selon quels contrôles ? – voir plus bas). Dans le cadre d'une collaboration avec Eric Duverger (Centre de Biophysique Moléculaire), et en s'inspirant des travaux anciens de Jean Trichet et Michel Monsigny, nous avons tenté de localiser la N-acétyle-glucosamine, monomère de chitine, dans des chitinozoaires du Silurien au moyen d'anticorps de N-acétyle-glucosamine marquée d'un fluorochrome par microscopie confocale. Les

résultats ont été négatifs. Très récemment, cette piste a été relancée, avec des résultats qui paraissent prometteurs[195].

C'est avec cette volonté de voir, de visualiser nos objets d'études que nous avons organisé, au sein du Réseau Matière Organique, l'Ecole Chercheur/Ecole Thématique VIZMO, en mars 2015. Nous avons, par exemple, produit des modèles moléculaires des chromatogrammes d'ions spécifiques par découpe laser (Figure 51) pour mieux expliquer la construction et l'intérêt de ces chromatogrammes, et des modèles virtuels de matières organiques.

e) Le toucher

La géochimie organique est bien souvent une science de l'impalpable. Alors que le géologue, encore une fois, manipule l'échantillon, le teste, le touche, pour estimer la granulométrie, repérer la texture, le géochimiste organicien perd le contact physique avec l'échantillon dès lors que celui-ci est extrait pour analyses moléculaires. L'essentiel de la relation entre le géochimiste organicien et son objet d'étude est ensuite réalisée à travers des écrans. Il existe pourtant des moyens de reprendre contact avec les objets d'étude, du simple modèle moléculaire en plastique aux modèles numériques de données complexes qui peuvent désormais être rendus concrets/physiques par impression 3D, ou avec lesquels il est possible d'interagir en réalité augmentée ou physiquement par des interfaces avec retour de force. Dans le cadre de VIZMO, nous avons souhaité appréhender les démarches et méthodes de visualisation physique et virtuelle des interactions dans des milieux complexes contenant des matières organiques. Il s'agissait dans un premier temps d'identifier les outils de mesure qui permettent de caractériser les interactions puis de s'approprier des outils de visualisation et de matérialisation innovants utilisés dans d'autres communautés. Nous avons, lors de VIZMO, produit des modèles moléculaires ou des colonnes de sols analysés par tomographie par impression 3d qui nous ont, ensuite, permis de les manipuler. Lors de l'école suivante organisée par ResMO et dédiée aux isotopes, nous avons poursuivi avec un atelier de pâte à modeler dont l'objectif était de formaliser les concepts en isotopie à travers des objets. Exercice très formateur, très perturbant, qui demande à être poursuivi.

3. Décrire nos échantillons par les sens

Le premier volet de ce projet vise à décrire nos échantillons par les sens. En fait, il s'agit d'une démarche habituelle de la plupart des naturalistes, comme indiqué plus haut. Pour le géochimiste organicien, les premiers réflexes lorsqu'un extrait de sédiment est produit est d'en évaluer la richesse par la couleur et la limpidité et de repérer la présence éventuelle de soufre par l'odorat. Lors du séminaire ResMO de Trégastel (2018), nous avons dédié un atelier à l'analyse sensorielle et interrogé les participants sur ce que pourraient apporter les sens dans leurs travaux de recherche, sur la base des questions suivantes :

- Et si nous faisions confiance à nos sens ?
- Quelle pourrait être la plus-value d'une exploration sensorielle de nos objets d'étude ?
- Quelle en serait la validité, à quel point est-ce objectif ?

La phase de purge de cette atelier a révélé que, sous des abords décalés, ces questions participaient au quotidien de chacun à travers ses sens. Lors des missions sur le terrain, d'abord (bruit du sol sous les pas : tourbière, rocailleux, sableux, desséché, humidifié; crissement d'une charrue pendant le labour; couleur du sol; température d'un tas de fumier; homogeneité; odeur de champignons, d'angiospermes et gymnospermes herbe coupée, paille, odeurs d'hydrocarbures en contexte urbain, épandage de fumier…), lors des phases de prélèvement (crissement du carottier ou de la tarière, présence et taille de débris végétaux, …), de préparation et d'analyse des échantillons (fonctionnement des appareils, couleur des dépôts et extraits, couleur des eaux et COD, anneaux colorés lors des séparations d'extraits sur colonnes). Au total, les réponses apportées par les

[195] Ferrer, F.M., Bailey, J.V., Corsetti, F., Moldowan, J.M., Barbanti, S.M., Caron, D., Bryant-Huppert, J., 2018. Assessing biomarker syngeneity: An in situ approach using monoclonal antibodies. Organic Geochemistry 124, 112-122.

participants permettent d'envisager développer une réelle analyse sensorielle de nos échantillons à travers leurs propriétés organoleptiques (propriétés susceptibles d'exciter un récepteur sensoriel) :

- Aspect : limpide, clair, couleur, trouble, mat, nappant, brillant, terne, forme
- Odeur : brûlée, épicée, agréable, franche, prononcée, dominante...; poisson, viande, herbes...; odeurs, caractéristiques du produit : menthe, vinaigre, ail…
- Saveurs : salée, sucrée, acide, amère, poivrée, fade, insipide, prononcée, corsée, juste, franche, épicée, piquante, savoureuse, aigre, douce, aigre-douce, veloutée, flatteuse, sèche.
- Texture : croustillante, molle, dure, collante, épaisse, liquide, fluide, cassante, cordée, granuleuse, homogène, hétérogène, fondante, crémeuse, onctueuse, ferme, pâteuse, consistante, sèche, nappant, feuilletée.

Les participants à cet atelier ont également été très prolixes sur les analogies d'une telle démarche avec d'autres communautés, communautés qu'il faudra contacter pour aller plus avant dans ce projet : maîtres affineurs pour étudier les processus de maturation des composts, industries agroalimentaires pour suivre les normes d'analyses organoleptiques, nez, œnologues, etc. La possibilité d'entrer de manière virtuelle dans les échantillons est également revenue à plusieurs reprises : explorer un sol, des racines, un pore. Il s'agit non seulement d'une "visite" 3d de ces objets, mais également d'un accompagnement sensoriel de cette visite.

L'odorat est sans doute le sens qui permet les plus fines descriptions et les plus fines discriminations. Une étude[196] indique ainsi que les humains peuvent discriminer 1 trillion de stimuli olfactifs, contre quelques millions de couleurs et un demi-million de sons. Aussi, les premiers tests que j'ai réalisés ont concerné la description des échantillons et extraits par l'odorat. Peu après ma thèse, j'ai contacté Vincent Schaller, nez chez Firmenich, pour tester le potentiel de la description olfactive d'extraits des sédiments du Lac Caço. Quatre échantillons (15, 126, 164 et 279) correspondant à des conditions environnementales très distinctes (forêt humide, savane, cerrado; Figure 52) ont été sélectionnés pour cette étude. Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

164	Cet échantillon présente un arôme assez puissant. Son odeur est caractérisée par deux notes dominantes : (1) une note "aromatique" (que l'on retrouve dans les herbes aromatiques) et lui confère une connotation "culinaire", dominée par l'odeur du céleri; (2) une note herbale qui est retrouvée par exemple dans l'odeur de l'herbe sèche. Deux notes mineures sont notées : Epicé et Algues sèches. Au total, cet échantillon présente une touche culinaire.
15	Cet échantillon ressemble à l'échantillon 164 mais avec deux différences : (1) un coté plus boisé, sec; (2) une note métallique, que l'on retrouve dans certains aldéhydes et qui rappelle l'odeur d'un métal coupé. Par ailleurs, la touche culinaire est moins prononcée que dans l'échantillon 164. En revanche, l'échantillon 15 est plus salé, plus poussiéreux.
126	L'échantillon 126 ressemble à l'échantillon 15 en moins puissant et moins métallique, avec des touches de safran. Cet échantillon présente un caractère intermédiaire entre l'échantillon 15 et l'échantillon 164.
279	L'échantillon 279 présente un caractère très boisé (cèdre, santal, mousse de chêne) et très poussiéreux, avec un aspect salé, rappelant au total l'odeur d'un vieux parquet.

[196] Bushdid, C., Magnasco, M. O., Vosshall, L. B., Keller, A., 2014. Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli. Science 343, 1370-1372.

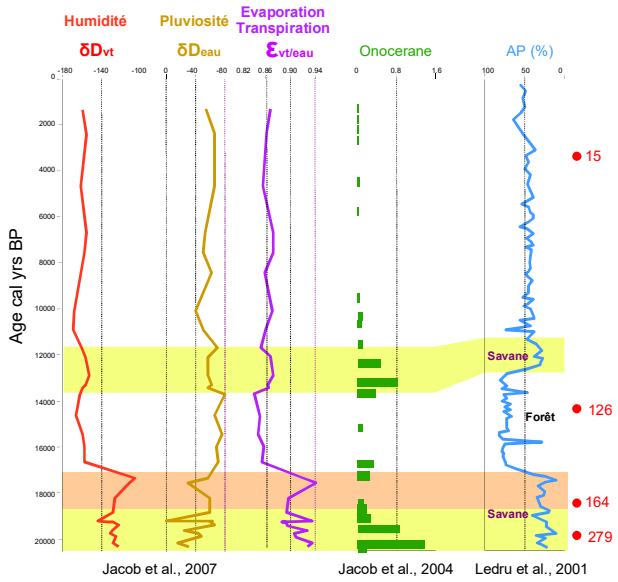


Figure 52 : Position en fonction de l'âge des sédiments du Lac Caço (carotte 98-3) et du contexte environnemental (Ledru et al., 2001; Jacob et al., 2004; 2007) des échantillons 15, 126, 164 et 279 pour lesquels une analyse olfactive a été réalisée par Vincent Schaller.

En amont du séminaire ResMO 2018 de Trégastel, j'ai collaboré avec sept étudiantes du Master FESIPCA (Université de Versailles-Saint-Quentin) dont le cœur de métier est l'analyse sensorielle en aromatique alimentaire, parfumerie et cosmétique. J'ai soumis à ces étudiantes un lot d'échantillons et d'extraits de sols provenant du campus CNRS d'Orléans, prélevés sous pins, chêne et sous prairie. Les résultats de leur analyse sont donnés dans le tableau ci-dessous.

		Echantillon		Extrait
		Olfactif	Touché/Visuel	Olfactif
PIN SYLVESTRE	OL	Humidité, vert, aqueux, plastique, boisé sec, résineux, fruité: prune, artichaut		Pin, résine, térébenthine, vert, balsamique
	OF	Terre, humidité, sucré, boisé, fermentation, marine	Mousse plus dure que le Chêne, copeau de bois, hétérogène, végétale	Très discret, résineux, terpénique, aiguilles de pins, balsamique, terreux, avec un coté vert
	OH	Terre, humidité, boisé vétiver, froid, minéral		Céleri, mousse, boisé sec, résineux, argile, minéral, coté fruits confits, eugénol
	A	Terre, sucré, B- caryophyllène, baies roses, plus minéral, argile, sable du lac		Métallique, muscade, champignon séché, pluie, pyraziné, résineux, montant
PIN NOIR	OL	Décomposition végétale, résineux, balsamique, fruité, camphré		Poivré +++, épicé, eugénol, boisé, encens, poussiéreux, térébenthine, cire, résineux, cassis, camphré, eucalyptus, acide, humidité, rose, géranium, balsamique
	OF	Pluie, pomme de terre, géosmine, humide, terre, feuille, foin, automne ensoleillé, marin, décomposition végétale, cave, champignon, escargot, terreux cave, froid, forêt chlore, moisi, résineux, balsamique	Germes, léger, végétal	Cumin, muscade, coumarine, poudre, amandé, salé, sauce soja, bouillon cube, résineux, tabac, mimosa, eugénol, champignon, foin, encens, poussiéreux, chien mouillé, cassis, camphré, térébenthine
	OH	Sable, escargot, humide, champignon de Paris, poussiéreux, terreux, moisi, lac eau douce, olive noire	Texture similaire à du terreau, granuleux, léger, marron foncé, fibreux	Sable minéral, fumé, encens, épicé, camphre, cirage, térébenthine, poudreux, cave, mabdanum, cèdre, sec, résineux, soufré, fruit jaune, poussiéreux, olive noir, mimosa
	A	Oxydé, sable, terre, mousse, PO1, ciment, artichaut, terreaux, discret argile, cèdre, minérale, sec		Oxydé, foin poussiéreux, épicé, cave, poivre, légume cuit, caoutchouc, plastique, chimique, minéral, framboise, foin
CHENE	OL	Plastique, cerise, champignon de Paris, cèpe, foin, froid, chlore, humidité, fruits confits		Mimosa, thé, menthe - feuilles de menthe, marron, pâtes cuites, bouillon cube, fève tonka, encens légèrement poivré, tabac blond, cerise, fruit confit, craint de chaise, grain pour chevaux- bonbons pour chevaux
	OF-OH	Sent plus fort que le pin Sylvestre OH, pluie, intense, végétale, bois, plus puissant que les autres échantillons de chêne, escargot, terrain humide	Terreux, Moelleux, marron, souple, racine	Pas très puissant, foin, muscade, boisé sec, poussière, mousse végétale, pomme, poire, métallique, minérale, lentille, tabac blond, figue, cerise
	A	Champignon, vert, frais, minéral, foin, sable, mousse ++, cave sèche, coté sucré, argile	Poudreux, granuleux, assez homogène, sableux, marron plus clair que le chêne OF-OH	Chien mouillé, pluie, puissant, légèrement poivré, métallique, prune séchée, boisé, amère (solvant chimique), minérale, florale, grenier poussière, fruits confits
PRAIRIE	OL	Aqueux, vert, eau croupie, serre, herbe coupée, cèleri, algues, maté, asperge		Métallique, champignon séché, salé, sauce soja, gras, artichaut, béton, foin
	A	Terre, humidité, minérale, cailloux	Lourd, compact, texture granuleuse, sableux, marron clair	Caoutchouc, boisé sec, chou, madérisé, oxydé, pharmaceutique

Le premier élément qui frappe à la lecture de ce tableau est la multitude des critères de caractérisation. Le second tient à la pertinence des descriptions qui permettent au moins de distinguer les horizons de sols et les couverts végétaux. Ces travaux préliminaires constituent un premier test de validité de l'approche sensorielle des échantillons géologiques mais doivent être

confortés dans le cadre d'une démarche plus systémique et organisée, en collaboration avec des collègues des disciplines citées.

4. Décrire les écosystèmes actuels par les sens

Dans l'imaginaire collectif, le scientifique considère le monde à l'aune de sa discipline, de ses outils, de son champ lexical (Figure 53).

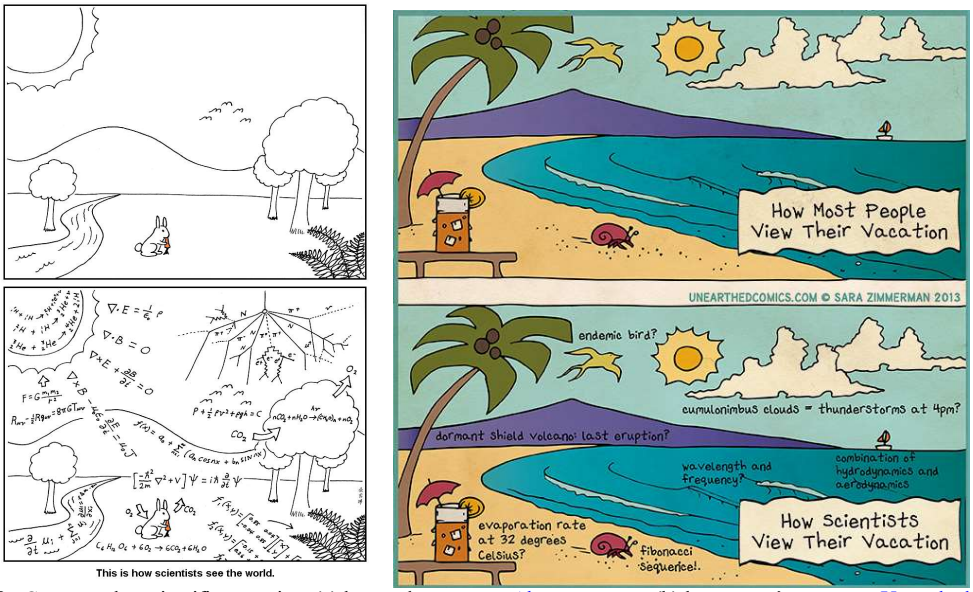


Figure 53 : Comment les scientifiques voient (a) le monde - source : Abstruse goose; (b) leurs congés - source : Unearthed Comics.

Ainsi naissent de véritables paysages organisés selon les "travers" de chaque communauté. Des paysages isotopiques (ou isoscapes) produits par la cartographie des valeurs de δ^2H et $\delta^{18}O$ des précipitations. Des paysages sonores (ou soundscapes) pour étudier soit la diversité biologique au sein d'un écosystème naturel soit le fonctionnement des socio-écosystèmes urbains. Des paysages olfactifs, enfin, constitués de composés organiques volatils piégés par un organogel et utilisé en criminologie. Chaque odeur laissée par un criminel sur une scène de crime est spécifique des personnes qui y ont séjourné. En effet, chaque personne peut être caractérisée par une cartographie chimique de ses effluves corporels qui sont principalement déterminés par la génétique, mais également par l'alimentation, la santé l'activité, etc…

Le géochimiste organicien envisage lui aussi la Nature comme une organisation spatiale et temporelle de ses objets d'étude : des molécules organiques. Cette remarque est appuyée par de nombreuses illustrations dans la littérature des géochimistes organiciens qui considèrent le continuum bassin versant-archive sédimentaire, ou l'organisation stratigraphique des couches géologiques, selon une lecture essentiellement moléculaire (Figure 54).

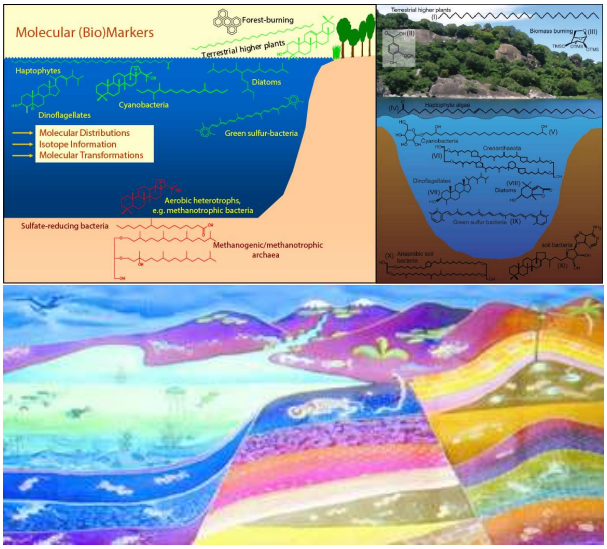
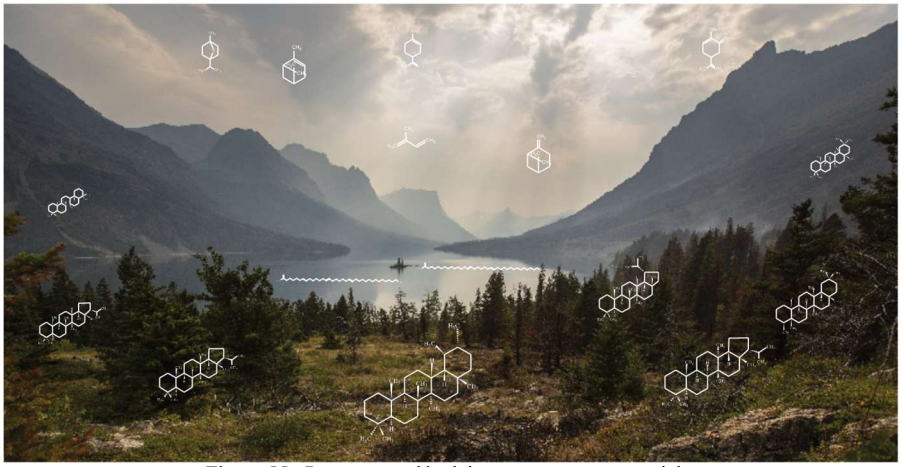


Figure 54 : Comment les géochimistes organiciens voient le monde. Sources : Tim Eglinton ; Castaneda et Schouten, 2011; The Biomarker Guide.


Figure 55 : Paysages moléculaires et paysages sensoriels.

Ainsi, il est possible d'imaginer de véritables paysages moléculaires (Figure 55) qui sont immédiatement traduisibles en paysages sensoriels : les teintes de vert distinctes entre prairies et forêts, de feuillus ou de résineux, leurs évolutions durant l'automne ; les odeurs respectives de l'herbe fraîchement coupées ou des résines de pinacées ; les touchers distincts des écorces de bouleau et de sapin… Des caractérisations olfactives à l'échelle de l'écosystème pourraient être réalisées, par exemple, au moyen de nez électroniques[197]. Si l'échelle du paysage (au sens des géographes) est la plus compréhensible ou immédiate, de tels paysages moléculaires peuvent également être envisagés à petite échelle, jusqu'à celle de l'échantillon, voire les interfaces entre matières (phase minérale/phase organique, par exemple). Pour ces très petites échelles, l'obtention d'images, d'odeurs ou de sons suppose des méthodes de caractérisation innovantes qui sont en plein développement, par exemple dans le cadre des Défis Interdisciplinaire sur l'Instrumentation aux Limites et sur la Nano-Métrologie de la Mission pour Interdisciplinarité du CNRS.

5. Retracer les ambiances sensorielles passées

Si des paysages moléculaires et sensoriels peuvent être imaginés pour l'Actuel, leurs équivalents anciens peuvent également être considérés. Des travaux originaux tentent par exemple de reconstituer les couleurs des fossiles d'insectes, des plumes de dinosaures[198,199], des

[197] Baby, R.E., Cabezas, M., Walsö de Reca, E.N., 2000. Electronic nose: a useful tool for monitoring environmental Contamination. Sensors and Actuators B 69, 214–218.
[198] Zhang, F., Kearns, S.L., Orr, P.J., Benton, M.J., Zhou, Z., Johnson, D., Xu, X., Wang, X., 2010. Fossilized melanosomes and the colour of Cretaceous dinosaurs and birds. Nature 463, 1075-1078.

coquillages[200] ou des yeux de poissons[201], si bien que certains auteurs proposent d'instaurer un nouveau champ de recherche autour des paléocouleurs[202]. Au-delà de reconstructions purement visuelles – citons également les atmosphériciens qui étudient l'impact d'éruptions volcaniques sur la base de tableaux de grand maîtres[203] -, imaginons reconstruire des paléopaysages sensoriels complets impliquant également les sons, comme l'ont fait des historiens sur les ambiances sonores de Paris au Moyen-Age, mais aussi les odeurs, voire les gouts (cf. supra). Par ses objets d'étude, mais également par son expertise "paléo", la géochimie organique doit pleinement participer à cette aventure.

6. Les sens comme vecteurs de médiation

La définition même de la géochimie organique peut revêtir un caractère austère, augmenté de son caractère interdisciplinaire qui la rendent sans doute rédhibitoire à une appropriation par une audience large. Pourtant, quelques initiatives, sans doute trop limitées dans leur diffusion, ont permis de rendre la géochimie organique plus accessible au grand public. Le Guide Illustré du Pétrole[204] est le premier exemple d'ouvrage qui aurait pu permettre de mettre la géochimie organique à portée du grand public, s'il avait été plus largement diffusé. Plus récemment, la publication de Echoes of Life[205] a permis de diffuser plus largement la vulgarisation de la géochimie organique à travers quelques histoires et illustrations. L'OGU de Bristol proposait un jeu de Paléodetective sur quelques résultats majeurs de ce groupe.

Pour contribuer plus largement à l'effort de médiation de la géochimie organique, pour la rendre plus accessible dans le cadre de collaborations, mais aussi de manière à en diffuser plus largement les principes et les résultats vers le grand public, les sens pourront être recrutés. En effet, les sens apparaissent comme un excellent moyen de capter l'attention pour aborder ensuite des questions plus complexes. A titre de comparaison, les nombreuses initiatives du site Compoundchem sont remarquables. D'une manière très pédagogique ce site explique de nombreuses sensations du quotidien par la chimie. Par exemple l'arôme des fleurs ; l'odeur de la pluie ; l'odeur de la décomposition ; de l'herbe fraîchement coupée.

Les produits finalisés de ce projet pourraient être des paysages virtuels, actuels ou anciens, en mode multi-échelle (du paysage à la molécule) depuis des modèles numériques de terrain augmentés de diverses couches (végétation, colonne d'eau pour un lac, sols) à des modèles moléculaires tels que ceux produits par M. Baaden[206]. Ces paysages seraient construits sur la base des univers virtuels comme ceux utilisés pour les jeux vidéos (Fortnite, Second life…), en développant fortement l'interaction avec les objets virtuels, sur la base, par exemple, des travaux d'O. Kreylos, et pourquoi pas en mode "serious game", i.e. les utilisateurs pourraient évoluer dans ces mondes moléculaires et participeraient à leur construction selon un schéma à la frontière entre Minecraft et Fold-It. Pour que l'immersion soit totale et que l'ensemble des sens soient recrutés, ces univers devront être augmentés de modules olfactifs, auditifs et tactiles (modules de retour de force, par exemple).

Au final, ce second projet, encore à un stade précoce de maturation, ouvre de nouvelles opportunités de collaboration très originales et très indisciplinaires, au-delà de celles que j'ai déjà pu nouer ou qui seront établies dans le cadre du projet de géochimie organique de l'Anthropocène.

---

[199] https://www.irishtimes.com/news/science/how-colourful-and-feathery-were-the-dinosaurs-1.3388512

[200] Caze, B., Merle, D., Schneider, S., 2015. UV light reveals the diversity of Jurassic shell colour patterns: examples from the Cordebugle Lagerstätte (Calvados, France). Plos One. DOI:10.1371/journal.pone.0126745.g001

[201] Lindgren, J., Uvdal, P., Sjövall, P., Nilsson, D.E., Engdahl, A., Schultz, B.P., Thiel, V., 2012. Molecular preservation of the pigment melanin in fossil melanosomes. Nature Communications DOI: 10.1038/ncomms181

[202] Vinther, J., 2015. A guide to the field of palaeo colour. BioEssays 37, 643-656. DOI:10.1002/bies.201500018

[203] Zerefos et al., 2014. Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. Atmos. Chem. Phys., 14, 2987-3015. DOI:10.5194/acp-14-2987-2014

[204] Annick Restlé. Le guide illustré du pétrole. Editions Belin, Paris 1986.

[205] Susan M. Gaines, Geoffrey Eglinton et Jürgen Rullkötter. Echoes of Life. What Fossil Molecules Reveal About Earth History. Oxford University Press, Oxford, 2008.

[206] https://www.youtube.com/user/marcbaaden

CURRICULUM VITAE

Jérémy JACOB
CRCN CNRS / Section 30 depuis octobre 2008
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

I. Thématiques de recherche

Outils moléculaires et isotopiques du diagnostic environnemental
Evolution des socio-écosystèmes durant l'Anthropocène
Interactions hommes/milieux/climats durant l'Holocène
Impacts des crises climatiques du Cénozoïque sur les écosystèmes continentaux

II. Formation

2003 Doctorat en Sciences de l'Univers - Mention "Très honorable avec les félicitations du jury".
Université d'Orléans/Institut des Sciences de la Terre d'Orléans. Dir. J.R. Disnar.

1998/1999 DEA Géologie, Géophysique et Géochimie Sédimentaires, Université de Lille.

1996/1997 Maîtrise de Géologie, Université de Bourgogne.

1996/1997 Advanced Diploma, Oxford Brookes University, Royaume Uni (ERASMUS).

1995/1996 Licence de Sciences de la Terre, Université de Bourgogne.

1992/1995 DEUG B, Université de Picardie.

1991/1992 MathSup Biologie, Arras.

1991 Bac C, Amiens.

III. Expérience professionnelle

2018- Chargé de Recherche Classe Normale au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

2008-2018 Chargé de Recherche 1ère classe CNRS à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

2008 Chercheur contractuel - ISTO, Orléans. Interactions Homme/Climat/Milieux dans les Alpes durant l'Holocène estimées au moyen des biomarqueurs moléculaires et de leur composition isotopique. ANR Pygmalion. Dir. F. Arnaud.

2007 Stage Postodctoral - ISTO, Orléans. GDR Forpro.

2006/2007 Stage Postdoctoral - ISTO, Orléans. Mécanismes de précipitation des carbonates dans les tapis microbiens d'un lac hypersalé (Chiprana, Espagne). ANR Cyanocarbo. Dir. P. Gautret.

2004/2006 ATER - Université d'Orléans. Dir. J.R. Disnar.
- Interactions Homme-Milieux-Climat durant l'Holocène reconstruites au moyen des lipides sédimentaires.
- Biomarqueurs spécifiques dans les graminées et dans les sédiments.
- Composition chimique des chitinozoaires. Coll. F. Paris.

2003/2004 Stage Postdoctoral - LSCE, Gif-sur-Yvette. Variations de la température de l'Atlantique Nord depuis 2000 ans reconstruites à partir des alcénones. Programme U.E. PACLIVA. Dir. M.A. Sicre.

2003 Séjour Postdoctoral - Brown University (USA). Variations paléohydrologiques au nord du Brésil depuis 20000 ans estimées au moyen du D/H moléculaire. EAOG Travel Scholarship. Dir. Y. Huang.

2003 Vacataire - AR2T/Université d'Orléans. Diagenèse des triterpènes pentacycliques.
2002 Auxiliaire du CNRS. Création d'une base de données de biomarqueurs moléculaires.
1999 Stage de Recherche - Institut Français du Pétrole. Modélisation de réservoirs carbonatés d'Oman au moyen du logiciel HERESIM. Dir. F. van Buchem.
1999 Stage de Recherche de DEA - GEOLINK (consultants pétroliers). Dir. T. Jacquin.
1997/1998 Service Civil : Aide à l'insertion, prospection archéologique, organisation du Festival du Film d'Archéologie d'Amiens, actions pédagogiques dans les écoles. Dir. T. Ben Redjeb.

IV. Compétences analytiques

Géochimie Organique

- Analyses globales de la matière organique : Rock-EvalT6, analyseur élémentaire, palynofaciès.
- Extraction, séparation et dérivation de biomarqueurs moléculaires.
- Identification et quantification de biomarqueurs moléculaires : GC-FID, GC-MS, GC-MS^n, Py-GC-MS.
- Détermination de la composition isotopique (δD, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) des biomarqueurs moléculaires par GC-C-IRMS.

V. Responsabilités analytiques

J'étais, avec C. Le Milbeau (IR responsable de la Plateforme de Géochimie Organique), co-responsable de la chaine d'analyse des lipides (extractions, purifications, dérivations, identification et quantifications et détermination des δ^2H, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ sur composés individuels) à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans. Cette chaîne est, dans la mesure du possible automatisée (Extracteur automatique ASE 200, système de séparation ASPEC (DIONEX), GC-MS (x2) et GC-irMS équipées de passeurs automatiques.

VI. Activités pédagogiques

1. Enseignement

- Responsable du parcours Hydro-Env du Master STUE de l'OSUC de 2016 à 2018.
- Co-responsable du module "Archives et Marqueurs" (M2) de l'OSUC -> 2018.
- Responsable des stages professionnels de L3 OSUC 2016-2018.
- Rédacteur de la nouvelle maquette du parcours Géo²ENV du Master STPE de l'OSUC 2018.
- Géologie générale et applications (L1, 20h, ->2010).
- Paléontologie et biostratigraphie élémentaires (L1, 20h, ->2010).
- Interventions dans les modules "Archives et Marqueurs" (M2), "Paléoclimats" (M2) de l'OSUC -> 2018 puis dans les modules Past Global Changes (M2) et Géochimie organique et isotopique (M1).
- Responsable du Module "Droit Environnemental, droit minier, droit des données" puis "Politique et Gestion Environnementale" (M2) de l'OSUC -> 2017

2. Encadrement

a) Postdoctorants et chercheurs invités

- O. Bertrand (EcosmetoCentre, 2015-2016)
- V. Terwilliger (STUDIUM Visiting Scientist; PalHydroMil).
- N. Bossard (EcosmetoCentre 2014, 6 mois) : Alimentation et gestion des bugs de la BDD Principasol.
- M. Lavrieux (PalHydroMil, 2013, 1 mois) : Réarrangements acides des triterpènes pentacycliques et impact sur le δ^2H.
- R. Zocatelli
    - Principasol (2011-2012) : biomarqueurs de végétations et principes actifs
    - EcosmetoCentre (2013-2014) : biomarqueurs de végétations et principes actifs

b) Doctorants

- J. Ghirardi : Changements environnementaux affectant les écosystèmes continentaux à la transition Eocène/Oligocène. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans - 2016.
- Participation à la thèse de R. Tramoy : Tester l'utilisation des isotopes stables de l'azote ($^{15}N/^{14}N$) des matières organiques sédimentaires terrestres comme marqueur paléoclimatique dans les séries géologiques pré-quaternaires. Thèse de Doctorat de l'UPMC- 2015.
- Participation à la thèse de G. Muia : The "Turkana Grits": Potential Hydrocarbon Reservoirs of the Northern and Central Kenya Rifts. Thèse de l'Université de Rennes I - 2015.
- Participation à la thèse de T. Guillemot. Réponses sédimentaires et moléculaires des remplissages lacustres groenlandais aux changements climatiques holocènes et à l'évolution des pratiques agropastorales. Thèse de l'Université de Franche Comté – 2015.
- S. Garel : Enregistrement de l'évènement hyperthermique du Paleocène/Eocène dans les sédiments continentaux à margino-littoraux du Bassin de Paris : Le signal organique. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris - 2013.
- Bossard N. Pertinence et calibration d'un nouveau marqueur paléohydrologique. Le rapport isotopique de l'hydrogène mesuré sur la miliacine. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans - 2013.
- Lavrieux M. Marqueurs d'érosion et de qualité des sols : inventaire, calibration et application à l'appréciation de l'impact des activités humaines sur la couverture pédologique durant l'Holocène. Thèse de Doctorat de l'Université de Tours - 2011.
- Participation à la thèse de Zocatelli R. Reconstrução paleoambiental Holocênica através de registros de marcadores orgânicos na região amazônica e nordeste do Brazil. Thèse de Doctorat de l'Université de Fluminense, Brésil - 2009.

c) Stages M2

- M. Réty : Dynamique temporelle des flux de polluants émergents dans les eaux usées en amont de station d'épuration. Cas de la station d'épuration d'Orléans La Source (Loiret, France). Stage de Recherche M2 Chimie Molécules Bioactives : Stratégie et Qualité en Chimie Analytique, 2016.
- B. Audiard : Contribution de l'outil biomoléculaire à l'identification du millet blanc dans le Caucase au cours de la Préhistoire et Protohistoire. Master 2 Préhistoire, Paléoenvironnement et Archéosciences. Université de Nice - 2016.
- A. Thibault : Analyse multiproxy d'une carotte de sédiments prélevée dans le réseau d'assainissement de l'AgglO. Stage de recherche M2 "Hydro-Env". OSUC - 2015.
- T. Guillemot : Evolution de l'occupation des sols autour du lac du Bourget depuis l'âge du Bronze. Stage de recherche M2 "Hydro-Env". OSUC - 2012.
- J. Gérard. Héritage moléculaire des sols - Cartographie des paléochamps de millet à l'aide de la miliacine. Stage de recherche M2 "Géochimie Terre Durable". OSUC - 2010.
- Q. Chalon : Marquage environnemental chez les termites et autres insectes sociaux. Stage de recherche M2 "Sciences de l'Insecte", Université de Tours - 2010.
- S. Garel : Caractérisation de la matière organique sédimentaire à la limite Paléocène/Eocène dans la coupe de Vasterival (Haute Normandie). Stage de recherche de M2, ISTEP/UPMC - 2010.

d) Stages M1

- M. Cadel : Dynamique des écosystèmes continentaux en réponse aux facteurs de forçage orbitaux à la transition Eocène / Oligocène. Stage de recherche M1. OSUC - 2018.
- F. Renaud : Caractère diachrone de la diffusion de la culture du millet dans les Alpes à l'âge du Bronze. Apport de la miliacine dans les sédiments du Lac d'Aiguebelette. Stage de recherche M1. OSUC - 2018.
- B. Maestracci : Granulométrie haute résolution des sédiments de la Chambre à Sable d'Orléans et historique des précipitations. Stage de recherche M1. OSUC - 2018.

- A. Diacre : Nature et origine des polluants provenant des transports dans une archive sédimentaire anthropique – cas des sédiments de la chambre à sable d'Orléans. Stage de recherche M1. OSUC - 2018.
- G. Wuillot : Apport des triterpènes pentacycliques et de leur composition isotopique en hydrogène à la reconstruction paléoenvironnementale du site de Kyambangunguru (Tanzanie). Stage de recherche M1. OSUC - 2017.
- F. Rémy : Etude comparative des dépôts sédimentaires sur une série de carottes effectuées dans un bassin sédimentaire anthropique inscrit dans le cadre du projet Golden Spike. Stage de recherche M1. OSUC - 2017.
- E. Maisonhaute : Molecular organic fingerprints as keys markers of depositional environments of terrestrial organic matter. Application case on the Mannville Group organic matter-rich deposits (Alberta, Canada). Stage de recherche M1. OSUC - 2016.
- D. Khalifé : Impacts des conditions d'irrigation et des variétés sur la composition moléculaire et isotopique (δ^2H) des lipides de maïs. Stage de recherche M1. OSUC - 2016.
- A. Thibault : Evolution des conditions environnementales durant le Paléocène autour du Maar de Menat. Stage de recherche M1. OSUC - 2014.
- M. Priou : Evaluation du potentiel d'archivage paléoenvironnemental des accumulations sédimentaires dans le réseau d'assainissement de l'AgglO. Stage de recherche M1. OSUC - 2014.
- C. Boitier : Screening des molécules polaires dans des échantillons géologiques. Stage de recherche M1 Chimie, option Stratégie et Qualité en Chimie Analytique, Université d'Orléans, 2013
- C. Van Haert : Apport des biomarqueurs moléculaires à l'explication des hécatombes d'Iguanodons du gisement de Bernissart. Stage de recherche M1. OSUC - 2013.
- C. Pareux : Analyse moléculaire comparée de deux épisodes détritiques préhistoriques dans les sédiments du lac d'Aydat. Stage de recherche M1. OSUC - 2013.
- L. Soltysiak : Peut-on mesurer l'impact de l'implantation d'une végétation de type C4 dans un bassin versant par le $\delta^{13}C$ de biomarqueurs moléculaires ? Application à l'arrivée du millet autour du Lac du Bourget vers 1700 av J.C. Stage de recherche M1. OSUC - 2011.
- J. Sauze : La miliacine dans *Chaetomium olivaceum* : biotransformation ou synthèse de novo ? Stage de recherche M1. OSUC - 2011.
- M. Alpha Diaby : Sédimentation organique récente dans un étang de Sologne (Le Mousseau) à Nouan-le-Fuzelier. Stage de recherche de M1, OSUC - 2009.

e) Licence 3

- A. LeHouezec : Gestion de la base de données LinkOSUC. Stage de L3 OSUC, 2018.
- A. Saucray : Recensement du patrimoine de la zone Est d'Orléans. Stage de L3 OSUC, 2016.
- F. Renaud : Organisation des contacts de l'OSUC dans une base de données multi-contributeurs. Stage de L3 OSUC, 2017.
- E. Dru : Création d'une base de données relationnelle des contacts de l'OSUC. Stage de L3 OSUC, 2016.
- M. Vaca : Audit des pratiques au sein la Plateforme de Géochimie Organique de l'ISTO. Stage de L3 OSUC - 2014.
- F. Gaboyer : A la recherche de biomarqueurs des communautés biologiques dans les sédiments récents du Lac du Bourget pour retracer les changements trophiques d'origine anthropique ou climatique. Stage de L3 mention Biologie-Biochimie, Université d'Orléans - 2009.

f) Stages DUT

- M. Béchard : Variabilité de la composition isotopique en hydrogène de la miliacine extraite des sols d'un champ de millet. Stage de fin d'étude IUT Génie Biologique Option Génie de l'environnement, Université de Tours, 2011.
- C. Py-Circan : Impact de la photodégradation sur le rapport isotopique en hydrogène de la miliacine et autres triterpènes pentacycliques. Stage de fin d'étude, IUT Chimie, Grenoble, 2012.

VII. Projets soumis/acceptés/refusés

Intitulé	Guichet	Période	Responsable	Fin. ISTO
ERODE	EC2CO-CNRS	2009-2010	J.R. Disnar (ISTO)	15 k€
OTARIE	Région Centre	2009-2012	A. Togola (BRGM)	
Pygmalion	ANR	2007-2011	F. Arnaud (EDYTEM)	
PalHydroMil	ANR	2011-2013	J. Jacob	140 k€
ArchéoChamps	AIR ArchéoMétrie	2011-2012	J. Jacob	15 k€
PaleoNitrogen	UPMC	2012-2015	J. Schnyder (ISTEP)	5 k€
Ecosmetocentre	EcoIndustries	2013-2016	P. Bernard (GreenPharma)	300 k€
COLD CASE - Re-opening of the Bernissart Iguanodon crime scene	BRAIN-be (gouv. belge)	2014-2018	J.M. Baele (U. Mons)	10 k€
BOIF - Archéologie des BOIssons Fermentées du Néolithique à l'Antiquité en France	LABEX Archimède	2014	P. Marinval (UMR 5140)	NF
CLIMAPEAT- Réponse des tourbières à sphaignes au changement climatique : interactions plantes–biodiversité du sol et cycle du carbone	ANR	2014	F. Laggoun (ISTO)	NF
OBservations enVIronnementales des métabOlismes UrbainS	ANR Défi 6	2014	J. Jacob	NF
MOLECULE - pastoralisMe & erosiOn: expLoration des biomarquEurs moléCulaires comme traceUrs des interactions Hommes-miLiEu	LABEX DRIIHM	2015-2017	A. Simonneau (ISTO)	3.5 k€
ASTIRIA - DynAmiquE Sédimentaire récente des écosysTèmes lagunaIres : AppRoche Intégrée de la Lagune de BigugliA	LABEX DRIIHM	2015-2017	A. Simonneau (ISTO)	10 k€
LOMBRICOM - LOMBRICOmpostage en présence de Minéraux	EC2CO-BIOHEFECT	2015	M.F. Dignac (Bioemco)	NF
IsoBioClim	ANR JCJC	2015-2018	G. Leduc (CEREGE)	?
Fire, water, and the trajectories of ancient civilizations in the mountains of the Horn of Africa	Belmont	2015	V. Terwilliger (U. Kansas)	NF
ORHIZOM	EC2CO-BIOHEFECT	2015	S. Gogo (ISTO)	NF
HERODE - Anthropocene Alpine History of EROsion Dynamics	ANR	2015	F. Arnaud (EDYTEM)	NF
GEStion adaptée des petits plans d'Eau (étangs) et de leurs bassins versants dans un conTexte climAtique sensible	ANR	2015	R. Nedjai (CEDETE)	NF
Linkages - Exploring natural archives for linking human activities and environmental responses through the ages	Ambizione (FNS)	2015	M. Lavrieux (EAWAG)	NF
Met²EnvOrl - Métrologie environnementale du métabolisme orléanais	APR region Centre	2016	J. Jacob	NF
CLIMAPEAT - Aboveground-belowground interactions and C cycle in Sphagnum peatlands in response to climate change	ANR PRCI	2016	F. Laggoun (ISTO)	NF
La teneur en eau du sol influence-t-elle la composition de lipides membranaires (alkyl tetraéthers de glycérol) utilisés comme marqueurs d'environnement ?	EC2CO-BIOHEFECT	2016	A. Huguet (METIS)	NF
PALCITY - Approche paléoenvironnementale des métabolismes urbains	EC2CO-BIOHEFECT	2016	J. Jacob	NF
OBservations enVIronnementales des métabOlismes UrbainS	ANR Autres savoirs	2016	J. Jacob	NF
Evolution du δ18O de l'O2 atmosphérique au cours du Cénozoïque	Projet interne OSUC	2016	J. Jacob	5 k€
COSMIC - Impact of water COntent and temperature on Soil MICroorganisms and their membrane lipids	ANR	2017	A. Huguet (Métis)	-
CRITLAKES - Les lacs grands et profonds: archives du fonctionnement de la zone critique	ANR	2017	F. Arnaud (EDYTEM)	-
CRITLAKES - Les lacs grands et profonds: archives du fonctionnement de la zone critique	ANR	2018	F. Arnaud (EDYTEM)	NF
HUNIWERS - Historical impact of urbanization on water quality, a diachronic study in Paris and surrounding areas.	ANR	2017	E. Pons-Branchu (LSCE)	NF
HUNIWERS - Historical impact of urbanization on water quality, a diachronic study in Paris and surrounding areas.	ANR	2018	E. Pons-Branchu (LSCE)	10 k€
MOVING - Modélisation de l'impact de la végétation sur l'érosion des formations marneuses : les Terres Noires du bassin de la Durance (France)	ANR	2018	C. DiGiovanni (ISTO)	-
ACQUA - SignAture géoChimiQue des sédiments piégés dans la lagUne de BigugliA : confrontation de la sédimentation des 20 dernières années avec l'inondation de novembre 2016	LABEX DRIIHM	2017	A. Simonneau	7 k€
Golden Spike - Enregistrement très haute résolution et multi-traceurs de l'Anthropocène	EC2CO-BIOHEFECT	2017-2018	J. Jacob	14 k€
D^{18}OLE - Evolution du δ18O de l'O2 atmosphérique durant les grandes crises climatiques du Cénozoïque	TELLUS-INTERVIE	2017	J. Jacob	8 k€
MOSAIC	APR IA – Région Centre	2017-2020	A. Simonneau	-
NF = non financé				

VIII. Animation scientifique

1. Sociétés savantes et réseaux

- Réseau Matière Organique : Membre du Comité Scientifique depuis 2006.
- Association des Géochimistes Organiciens Francophones (FROG) : Membre fondateur, membre du CA de 2013 à 2018.
- Société Française des Isotopes: Membre du CA depuis 2009 (interruption en 2015), Vice-Président en 2013-2015.
- Comité Scientifique du RGF depuis 2017
- Pilote du Réseau d'Instruments GEOF pour RéGEF
- Comité de pilotage du CAIRN depuis 2018
- Comité scientifique du Muséum Orléanais pour la Biodiversité depuis 2017

2. Participation à l'organisation de Conférences / Ecoles Chercheurs / Colloques

- Comité Scientifique et Comité d'Organisation du colloque Q11 : Le Quaternaire au Centre des Enjeux. Orléans, 13-15 février 2018.
- Comité d'Organisation d'une Action Nationale de Formation "Marquage isotopique et traçage multi-échelles pour comprendre les cycles de la matière organique dans l'environnement" MISTRAMO. Paris, 27-31 mars 2017.
- Comité Scientifique Journées Climat-Impact. Orsay, 15-16 novembre 2016
- Organisation d'une Ecole Thématique/ Ecole Chercheur "Visualiser, modéliser, matérialiser les matières organiques et leurs interactions dans l'environnement" VIZMO. Orléans, 15-19 mars 2015.
- "Isotopes et sols" : Après-Midi Scientifique de la SFIS, décembre 2015, Paris.
- Organisation d'un Après-Midi Scientifique de la SFIS: Applications Industrielles des Isotopes. 20 mai 2014 à Orléans.
- Comité d'Organisation/Comité Scientifique du Colloque ResMO. Biarritz, 25-29 janvier 2013.
- Organisation de la 1ère Réunion des Géochimistes Organiciens français (FROGS) à Orléans les 30-31 août 2012.
- ResMO : Comité d'Organisation/Comité Scientifique de l'Ecole Chercheur "Pour une recherche créative et innovante sur les matières organiques". Roscoff, 29 janvier-1er février 2012.
- STUDIUM Conference "Hydrogen isotopes as environmental recorders: from water to sedimentary biomarkers through biological systems" à Orléans, 15-16 septembre 2011.
- Séminaire ResMO "Matières Organiques et Environnement", Sainte Maxime, 25-29 janvier 2009.
- Séminaire ResMO "Matières Organiques : Etat de l'Art et Perspectives", Carqueirane, 22-24 janvier 2006.

3. Organisation de sessions lors de congrès

- RST 2018 : Archivage géologique des pollutions.
- PAGES OSM 2017 : Convener de la session "From early human impacts to the Great Acceleration: A paleoscience perspective on the climate-landscape-human multiple connections".
- Goldschmidt 2017 : Convener de la session 11i : "Organic Geochemistry of the Anthropocene – from stratigraphy to Earth System".
- RST 2016 : "Géosystèmes Urbains".
- IMOG 2015 : Chairman de la session "Environmental geochemistry".
- ASF 2015 : "Les biomarqueurs moléculaires en Sciences de la Terre : de la cellule au paysage, de l'archéen à l'Anthropocène".

4. Evaluation de projets

- Comité Scientifique BIOHEFECT (EC2CO, INSU 2011-2015).

- Evaluation de projets pour Projet Emergence UPMC (1), Projet OT-Med (2), Projet NSF (1), Helmholtz-Association of German Research Centres (1), Bourse CIFRE (1), Bourse DIM/ASTREA (1), Syster 2016 (1), LEFE (3).

5. Comités de sélection

- Poste MCF "Forçages anthropiques et climatiques sur les cycles biogéochimiques à l'interface continent – océan". Université Pierre et Marie Curie, 2015.
- Poste MCF "Bioindicateurs et réponses des écosystèmes aux changements environnementaux". Université d'Aix-Marseille, 2014.
- Chaire d'Excellence CNRS "Eco-traitement, polluants, sols (chimie de l'eau/polluants organiques appliqués aux milieux naturels)". Université de Savoie, 2012.

6. Comités de thèse

- Comité de pilotage de la thèse de Céline Martin (CEREGE, 2015-2018)
- Comité de pilotage de la thèse de Alexia Paul (CEREGE, 2014-2017)

7. Participation à jurys de thèse

- Olivia Bertrand : Enregistrement moléculaire de changements d'usage des sols et de pressions anthropiques : l'exemple d'un étang piscicole (Lansquenet, Lorraine). Université de Lorraine, 2013.
- Lucille Bailly : Caractérisation moléculaire et isotopique de goudrons et résines archéologiques dérivés de conifères en contexte maritime. Soutenance le 08 avril 2015. Université de Strasbourg.
- Maxime Rageot : Les substances naturelles en Méditerranée nord-occidentale (VIe-Ie Millénaire BCE) : chimie et archéologie des matériaux exploités pour leurs propriétés adhésives et hydrophobes. Soutenance le 16 juillet 2015. Université de Nice.
- Nicolas Freslon : Etude des changements climatiques et de l'érosion en Corse au cours du Quaternaire à l'aide de nouveaux traceurs isotopiques et moléculaires. Soutenance le 7 octobre 2015. Université de Brest.
- Sarah Coffinet : Validation et application de biomarqueurs lipidiques pour la reconstruction des changements environnementaux en Afrique de l'Est. Soutenance le 08 octobre 2015. Université Pierre et Marie Curie.
- Céline Martin. Reconstruction des températures continentales en Europe de l'Ouest à partir de l'étude des tétraéthers ramifiés dans les sédiments du lac de Saint Front (Massif Central, France). Soutenance le 21 septembre 2018. Université d'Aix-Marseille.

8. Bases de données

- Création, alimentation et maintenance de la base de données de biomarqueurs moléculaires de l'OSUC.

9. Activité éditoriale

- Reviewer : Organic Geochemistry (20), Cahiers d'EDYTEM (1), Scientific Report (1), EPSL (1), Biogeochemistry (1), G3 (1), RCMS (1), Terra Nova (1), Bulletin de la Société Préhistorique (1).
- Editeur Associé au numéro spécial de Biogeochemistry publié suite au Séminaire ResMO de 2009.
- Co-gestion d'un numéro spécial de Geochimica et Cosmochimica Acta à la suite de la STUDIUM Conference sur les isotopes de l'hydrogène en 2012.

10. Actes de congrès

- 1ère Réunion Annuelle des Géochimistes Organiciens français. 30-31 août 2012, Orléans.
- STUDIUM Conference « Hydrogen Isotopes as Environmental Recorders ». 15-16 septembre 2011, Orléans.

11. Exercices de prospective

- Co-rédaction du Quadriennal 2012-2015 de l'ISTO pour le GP "Fonctionnement des biogéosystèmes" de l'ISTO.
- Prospective SIC 2013-2014 / Volet Paléo (A. Alexandre resp.) et bilan 2017.

12. Responsabilités à l'ISTO et à l'OSUC

- Co-organisation des séminaires, jeudi des doctorants à l'ISTO (2008-2012).
- Co-organisation des Conférences de l'OSUC (2010-2013).
- Membre élu du Conseil de Laboratoire 2013-2018.
- Membre de la Commission Communication de l'OSUC (2010-2013).
- Membre élu de la CRD de l'ISTO 2014-2018.
- Responsable de la cellule Com' de l'OSUC 2015-2017.

IX. Diffusion de la culture scientifique

1. Actions de communication dans les écoles, collèges et lycées, conférences grand public

- Organisation et participation à la Journée Portes Ouvertes de l'Université d'Orléans (2015, 2016, 2017)
- Organisation et participation au Forum de l'Orientation/ Forum de l'Emploi (2015, 2016, 2017)
- Organisation et participation à la Fête de la Science (2014, 2015, 2016) : organisation d'un concours photos (avec la Galerie du Lion) ; d'une excursion géologique, d'une conférence-débat (avec Radio-Campus Orléans), de conférences grand public, création d'un modèle réduit de bassin versant ; création du Bac à Sable à Réalité Augmentée – BIG BASAR, en collaboration avec le FabLab Orléanais, Centre.Science et Antea Group.
- Accueil de stagiaires de 3ème (entre 3 et 6 par an).
- L'Anthropocène et le milieu urbain : nouveaux dadas des géologues. Cycle de conférences du Centre Interdisciplinaire de Recherches archéologiques de la Somme, Amiens, 16 mars 2018.Conf de mars 2018.
- L'Anthropocène, le Clou d'Or et La Chambre des Secrets - Ou les tribulations d'un géologue dans le quotidien urbain. Mardis de la Science, Bourges, 13 mars 2018.
- La mémoire dans la boue. Podcast "Science on Tourne" diffusé le 24/05/2016 auprès de lycéens.
- Intervention avec Centre.Science dans le cadre de Cinémobile sur le film "La Glace et le Ciel". 2015, trois villes.
- Des molécules fossiles nous racontent l'histoire des sociétés humaines. Conférence C Génial, 15 avril 2015.
- Changements environnementaux et sédiments. Pour les Elèves du Lycée Silvia Monfort de Chartres, septembre 2012, Orléans.
- Présentation à l'Association Française pour les Enfants Précoces, 5 novembre 2011, Blois.
- Cuisiner les molécules fossiles. Conférences de la Fédération Archéologique du Loiret, Muséum d'Orléans, Septembre 2008, Orléans.
- Quelques Géo-recettes de cuisine moléculaire. Causeries de l'Association TribuTerre, Octobre 2008, Orléans.

2. Activité sur le web

- Compte Twitter : @jeremjacob
- Facebook : Jacob Jérémy
- Développement, maintenance et alimentation en contenu des sites web des projets PalHydroMil et Principasol.
- Gestion du site web FROG : développement d'un nouveau site, installation de la plateforme, réservation du nom de domaine.

- Gestion du site web de la SFIS développement d'un nouveau site, installation de la plateforme, réservation du nom de domaine, mise en place du paiement et de la gestion des adhérents en ligne.
- Gestion du groupe OSUC sur Facebook (400 membres).

3. Articles de vulgarisation

- L'étonnante mémoire des eaux usées. Journal du CNRS en ligne, 16/11/2016.
- Les témoins inattendus de l'histoire pastorale du Groenland. Jacob, J., Guillemot, T. Microscoop n°72, Juin 2015.
- Le cannabinol sédimentaire, vestige chimique du procédé ancestral de traitement du chanvre. Lavrieux, M., Jacob, J. Microscoop n°68, Juillet 2013.
- Publication des illustrations de "Echoes of Life" et du "Guide Illustré du Pétrole "sur le blog FROG.
- Shedding light on historic climate change. International Innovation, octobre 2013.
- Jacob, J., Disnar, J.R. et Arnaud, F., 2008. Un nouveau traceur moléculaire pour reconstituer les activités agricoles passées dans les archives sédimentaires. Lettre PIGB-PMRC sur le changement global.
- Jacob. J., 2008. Les fossiles moléculaires : témoins singuliers des interactions entre climat, milieux, et sociétés. Microscoop 17, novembre 2008.

4. Communiqués de presse CNRS

- Communiqué de presse CNRS : Le cannabinol sédimentaire témoigne d'un procédé ancestral de traitement du chanvre. 13 mai 2013.
- Communiqué de presse CNRS : Les sédiments du lac Igaliku témoignent de l'histoire pastorale du Groenland. 17 mars 2016.
- Communiqué de presse CNRS : Dans l'intimité isotopique des molécules fossiles: de nouvelles clés pour étudier le climat passé, 17 décembre 2016.

5. Articles de presse

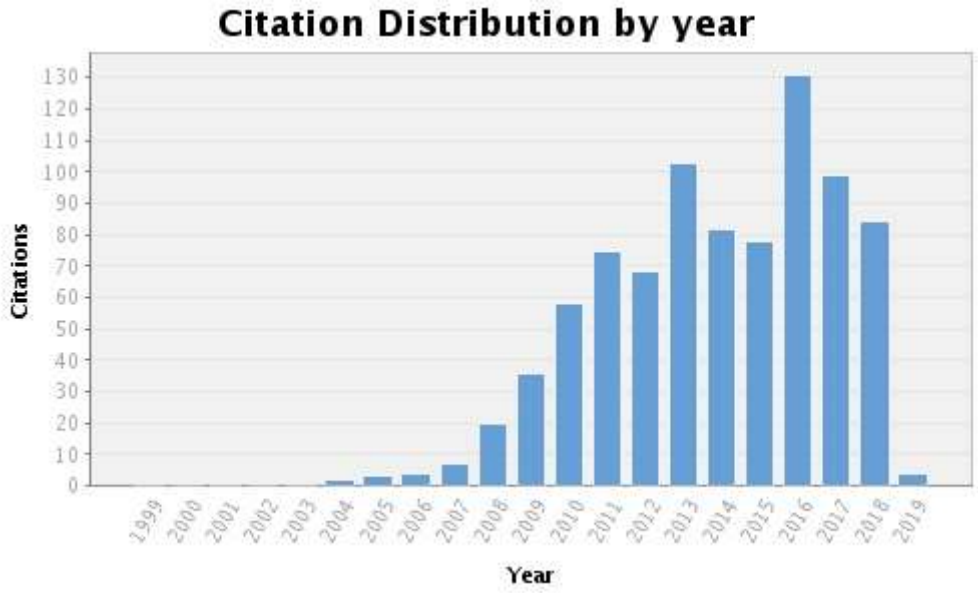
- La Studium Conference fait le plein d'hydrogène. Newsletter du STUDIUM, Automne 2011.
- L'eau et l'hydrogène font bouillonner les chercheurs du monde entier. Puissance2D, 02/10/2011.
- Conférence "Evolution du climat". La République du Centre, 15/09/2011.
- Dans les coulisses de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans. La République du Centre, 23 mars 2012.
- Interview Radiocampus sur l'Ecole VIZMO. 20 mars 2015.
- Créer des montagnes, invoquer la pluie. Article dans la République du Centre du 10/10/2015.
- Secrets d'histoire à travers les égouts. Article dans La République du Centre, 20/01/2016.
- Reportage France 3 Centre Val de Loire du 10/10/2015.
- Quand les égouts d'Orléans racontent notre histoire. Reportage France Bleu Orléans, 05/12/2016.
- L'étonnante mémoire des eaux usées. Le Journal du CNRS (édition web et papier – Hiver 2017).
- Des recherches sur une nouvelle ère. Article dans La Tribune Hebdo, N° 182, 5-11/04 2017.
- Les eaux usées apportent un regard neuf sur notre histoire. Article dans Le Monde du 11/04/2017.
- Le géologue qui lit dans les égouts. Le Parisien – Aujourd'hui en France, 02/04/2017.
- Une opération de forage dans les égouts d'Orléans. La République du Centre, 04/04/2017.
- Après les carottages dans la chambre à sable, Jérémy Jacob fait le point sur les études en cours. Article dans La République du Centre du 08/12/2017.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

"Sois satisfait des fleurs, des fruits, même des feuilles, si c'est dans ton jardin à toi que tu les cueilles" - Cyrano de Bergerac, Edmond Rostand.

I. Eléments bibliométriques

Au 09/01/2019
46 Publications de rang A
H index 16 (ISI – 854 citations), 19 (Google Scholar – 1246 citations)
250 communications orales et par affiche à congrès nationaux et internationaux



II. Thèse

Jacob, J., 2003. Enregistrement des variations paléoenvironnementales depuis 20000 ans dans le Nord Est du Brésil (Lac Caço) par les triterpènes et autres marqueurs organiques. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 296p.

III. Publications de rang A

1. Publiées

2018

1- Khalifa, Z., Affouri, H., Rigane, A., Jacob, J., 2018. The Albian Oceanic Anoxic Events record in central and northern Tunisia: paleogeographic and structural control settings. Marine and Petroleum Geology, 93, 145-165.

2017

2- Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Develle, A.L., Giguet-Covex, C., Jacob, J., Crouzet, C., David, F., Pignol, C., Arnaud, F., 2017. Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene. Catena 150, 39–52.

3- Zocatelli, R., Lavrieux, M., Guillemot, T., Chassiot, L., Le Milbeau, C., Jacob, J., 2017. Faecal biomarker imprints as indicators of past human land uses: source distinction and preservation potential in archaeological and natural archives. Journal of Archaeological Science 81, 79-89.

4- Thiebaut, T., Fougère, L., Destandau, L., Réty, M., Jacob, J., 2017. Temporal trends in the occurrence of human-excreted pollutants in wastewater treatment plant influents: toward a

better knowledge of mass loads fluctuation. Science of the Total Environment, 596-597, 246-255.

2016

5- Zocatelli, R., Moreira-Turcq, P., Jacob, J., Cordeiro, R.C., Boussafir, M., Le Milbeau, C., Bernardes, M., Turcq, B., 2016. Holocene land cover dynamics in Curuai Floodplain inferred from lacustrine biomarkers. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 443, 237–248.

6- Berdagué, P., Lesot, P., Jacob, J., Terwilliger, V.J., Le Milbeau, C., 2016. Contribution of NAD 2D-NMR in liquid crystals to the determination of hydrogen isotope profile of methyl groups in miliacin. Geochimica et Cosmochimica Acta 173, 337–351.

7- Motuzaite-Matuzeviciute, G., Jacob, J., Telizhenko, S., Jones, M.K., 2016. Miliacin in paleosoils from early iron age in Ukraine reveal paleofields of broomcorn millet. Archaeological and Anthropological Sciences, 8, 43-50.

8- Dubois, N., Jacob, J., 2016. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives: A review. Frontiers in Ecology and Evolution 4:92, doi: 10.3389/fevo.2016.00092.

9- Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, J., Jacob, J., Sebilo, M., Derenne, S., Philippe, M., Huguet, A., Pons, D., Baudin, F., 2016. The Pliensbachian-Toarcian paleoclimate transition: New insights from organic geochemistry and C, H, N isotopes in a continental section from Central Asia. Palaeo^3 461, 310-327.

2015

10- Guillemot, T., Zocatelli, R., Bichet, V., Jacob, J., Gauthier, E., Massa, C., Le Milbeau, C., Richard, H., 2015. Evolution of pastoralism in Southern Greenland during the last two millennia reconstructed from bile acids and coprophilous fungi spores in lacustrine sediments. Organic Geochemistry 81, 40-44.

2014

11- Zocatelli, R., Jacob, J., Gogo, S., Le Milbeau, C., Rousseau, J., Laggoun-Défarge, F., 2014. Variability of soil lipids reflects vegetation cover in a French peatland. Organic Geochemistry 76, 173-183.

12- Garel, S., Quesnel, F., Jacob, J., Roche, E., Le Milbeau, C., Dupuis, C., Boussafir, M., Baudin, F., Schnyder, J., 2014. High frequency floral changes at the Paleocene-Eocene Boundary revealed by comparative biomarker and palynological studies. Organic Geochemistry 77, 43-58.

2013

13- Terwilliger, V., Eshetu, Z., Disnar, J.R., Jacob, J., Adderley, P., Huang, Y., Alexandre, M., Fogel, M., 2013. Environmental changes and the rise and fall of civilizations in the northern Horn of Africa: An approach combining δD analyses of land-plant derived fatty acids with multiple proxies in soil. Geochimica et Cosmochimica Acta 111, 140-161.

14- Le Milbeau, C., Lavrieux, M., Jacob, J., Zocatelli, R., Disnar, J.R., 2013. Diversity of methoxy-serratenes in a soil under a conifer forest evidences their potential as biomarkers of Pinaceae. Organic Geochemistry 55, 45-54.

15- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Roche, E., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Iakovleva, A., Yans, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2013. Paleohydrological changes recorded in terrestrial sediments of the Paleocene-Eocene boundary (Normandy, France). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 376, 184-199.

16- Lavrieux, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Le Milbeau, C., Miras, Y., Andrieu-Ponel, V., 2013. Sedimentary cannabinol tracks the history of hemp retting. Geology 41, 751-754.

17- Lavrieux, M., Disnar, J.R., Chapron, E., Bréheret, J.G., Jacob, J., Miras, Y., Reyss, J.L., Arnaud, F., 2013. 6,700-year sedimentary record of climatic and anthropic signals in Lake Aydat (French Massif Central). The Holocene 23, 1317-1328.

18- Hatté, C., Bréheret, J.G., Jacob, J., Macaire, J.J., Argant, J., 2013. Refining the Sarlième palaeolake (France) Neolithic chronology by combining several radiocarbon approaches. Radiocarbon 55, 979-992.

19- Terwilliger, V.J., Jacob, J., 2013. Introduction: Hydrogen isotopes as environmental recorders. Geochimica et Cosmochimica Acta 111, 1-4.
20- Delarue, F., Disnar, J.R., Copard, Y., Gogo, S., Jacob, J., Laggoun-Défarge, F., 2013. Can Rock-Eval pyrolysis assess the biogeochemical composition of organic matter during peatification? Organic Geochemistry 61, 66-72.
21- Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., Sauze, J., Terwilliger, V., Poissonnier, B., Vergès, E., 2013. Distribution of miliacin (olean-18-en-3β-ol methyl ether) in broomcorn millet (Panicum miliaceum), and other reputed potential sources. Consequences on the use of sedimentary miliacin as a tracer of millet. Organic Geochemistry 63, 48-55.
22- Jacob, J., Disnar, J.R., 2013. Conference report on the first meeting of French organic geochemists. Environmental Science and Pollution Research 20, 7482-7485.

2012

23- Zocatelli, R., Turcq, B., Boussafir, M., Cordeiro, R.C., Disnar, J.R., Lima da Costa, R.L., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Bernardes, M.C., Jacob, J., 2012. Late Holocene paleoenvironmental changes in Northeast Brazil recorded by organic matter in lacustrine sediments of Lake Boqueirão. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 363-364, 127-134.
24- Zocatelli, R., Lavrieux, M., Disnar, J-R., Le Milbeau, C., Jacob, J., Bréheret, J.G., 2012. Free fatty acids in Lake Aydat catchment soils (French Massif Central): sources, distributions and potential use as sediment biomarkers. Journal of Soils and Sediments 12, 734-748.
25- Zocatelli, R., Bernardes, M., Campello Cordeiro, R., Albuquerque, A.L., Sifeddine, A., Jacob, J., Boussafir, M., 2012. Composição da matéria orgânica lacustre como ferrementa na reconstrução paleoambiental na Lagoa do Caçó, Maranhão, Brasil. Geochimica Brasiliensis, Ouro Preto, 26 67-78.
26- Lavrieux, M., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., Jacob, J., Le Milbeau, C., Zocatelli, R., 2012. Preservation of an ancient grassland biomarker signature in a forest soil from the French Massif Central. Organic Geochemistry 51, 1-10.
27- Boussafir, M., Sifeddine, A., Jacob, J., Foudi, M., Cordeiro, R.C., Albuquerque, A.L.S., Abrão, J., Turcq, B., 2012. Petrographical and geochemical study of modern lacustrine sedimentary organic matter (Lagoa do Caçò, Maranão, Brazil): Relationship between early diagenesis, organic sedimentation and lacustrine filling. Organic Geochemistry 47, 88-98.
28- Arnaud, F., Révillon, S., Debret, M., Revel, Chapron, E., M., Jacob, J., Giguet-Covex, C., Poulenard, J., Magny, M., 2012. Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology. Quaternary Science Reviews 51, 81-92.

2011

29- Zocatelli, R., Jacob, J., Turcq, B, Boussafir, M., Sifeddine, A. Bernardes, M.C., 2011. Biomarker evidence for recent turf cultivation in Northeast Brazil (Lagoa do Boqueirão, RN). Organic Geochemistry 41, 427-430.
30- Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., Lallier-Vergès, E., Terwilliger, V.J., Boscardin, R., 2011. Variation in δD values of a single, species-specific molecular biomarker: a study of miliacin throughout a field of broomcorn millet (*Panicum miliaceum L.*). Rapid Communications in Mass Spectrometry 25, 1-9.
31- Lavrieux, M., Jacob, J., Le Milbeau, C., Zocatelli, R., Masuda, K., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., 2011. Occurrence of triterpenyl acetates in soil and their potential as chemotaxonomical markers of Asteraceae. Organic Geochemistry 42, 1315-1323.

2009

32- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Gauthier, E., Billaud, Y., Chapron, E., Bardoux, G., 2009. Impacts of new agricultural practices on soil erosion during the Bronze Age in the French Prealps. The Holocene 19, 241-249.

2008

33- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Vergès, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M. 2008. Millet cultivation history in the French Alps as evidenced by a sedimentary molecule. Journal of Archaeological Science 35, 814-820.
34- Sicre, M.A., Jacob, J., Ezat, U., Rousse, S., Kissel, C., Pascal Yiou, P., Eiríksson, J., Knudsen, K.L., Jansen, E. et Turon, J.L., 2008. Decadal variability of sea surface temperatures off North Iceland over the last 2000 yrs. EPSL 268, 137-142.
35- Disnar, J.R., Jacob, J., Morched-Issa, M., Arnaud, F. et Lottier, N., 2008. Assessment of peat quality by molecular and bulk geochemical analysis; application to the Holocene record of the Chautagne marsh (Haute Savoie, France). Chemical Geology 254, 101-112.
36- Massé, G., Rowland, S.J., Sicre, M.-A., Jacob, J., Jansen, E. et Belt, S.T., 2008. Abrupt climate changes for Iceland during the last millennium: evidence from high resolution sea ice reconstructions. EPSL 269, 565-569.
37- Jacob, J., Disnar, J.R., Bardoux, G., 2008. Carbon isotope evidence for sedimentary miliacin as a tracer of Panicum miliaceum (broomcorn millet) in the sediments of Lake le Bourget (French Alps). Organic Geochemistry 39, 1077-1080.

2007

38- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Albuquerque, A.L.S., Sifeddine, A., Turcq, B., 2007. Contrasted distributions of triterpene derivatives in the sediments of Lake Caçó reflect paleoenvironmental changes during the last 20,000 yrs in NE Brazil. Organic Geochemistry 38, 180-197.
39- Jacob, J., Huang, Y., Disnar, J.R., Sifeddine, Boussafir, M., A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2007. Paleohydrological changes during the last deglaciation in Northern Brazil. Quaternary Science Reviews 26, 1004-1015.
40- Guido, A., Jacob, J., Gautret, P., Laggoun-Défarge, F., Mastandrea, A., Russo, F. A., 2007. Organic geochemical insights into the depositional conditions of the Messinian Calcare di Base formation (Rossano Basin, Northern Calabria, Italy). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 255, 265-283.
41- Jacob, J., Paris, F., Monod, O., Miller, M.A., Tang, P., George, S.C., Bény, J.M., 2007. New insights into the chemical composition of chitinozoans. Organic Geochemistry 38, 1782-1788.

2005

42- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2005. Pentacyclic triterpene methyl ethers in recent lacustrine sediments (Lagoa do Caçó, Brazil). Organic Geochemistry 36, 449–461.

2004

43- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Ledru, M.-P., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2004. Onocerane attests to dry climatic events during the Quaternary in the Tropics. Organic Geochemistry 35, 289-297.
44- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., 2004. Major environmental changes recorded by lacustrine sedimentary organic matter since the Last Glacial Maximum under the tropics (Lagoa do Caçó, NE Brazil). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 205, 183-197.

2. En préparation

1- Jacob, J., Bossard, N., Bariac, T., Biron, P., Richard, P., Le Milbeau, C., Terwilliger, V., Vergès, E. Fractionation of hydrogen isotopes during lipid synthesis by Panicum miliaceum. Greenhouse experiments. Geochimica et Cosmochimica Acta.
2- Jacob, J., Le Milbeau, C., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y. Carbon and hydrogen isotopic insights into the diagenesis of pentacyclic triterpenes. A case study from archaeological layers preserved in Lake le Bourget (France). Geochimica et Cosmochimica Acta.
3- Jacob, J., Zech, M., Bossard, N., Bariac, T., Gashgaie, J., Terwilliger, V., Le Milbeau, C., Biron, P., Richard, P., Vergès, E. Isotopic evidence for the origin of oxygen in miliacin. RCMS.

4- Delarue, F., Disnar, J.R., Beny, J.M., Jacob, J., Gogo, S., Laggoun-Défarge, F. Relevance of Rock-Eval pyrolysis to infer organic matter pools and transformation pathways in a sphagnum-dominated peatland (Le Forbonnet peatland, France). Organic Geochemistry.

5- Jacob, J., Thibault, A., Simonneau, A., Hatté, C., Le Milbeau, C., Sabatier, P., Ardito, L., Augustin, L., Lefèvre, I., Morio, C., Di Giovanni, C. Lithology, stratigraphy and dating of anthropic sediments accumulated in a decantation tank in the unitary sewer network of Orléans (France). Radiocarbon

6- Jacob, J., Huguet, A., Bauer, H., Boulila, S., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Quesnel, F., Dupont-Nivet, G. Major environmental changes preceded the Eocene/Oligocene Transition by 2.3 Myr on land. Nature Communications.

7- Jacob, J., Thibault, A., Simonneau, A., Sabatier, P., Le Milbeau, C., Ardito, L., Morio, C., DiGiovanni, C. Meteorological and anthropic controls on sediment accumulation in a decantation tank collecting a unitary sewer network (Orléans, France). Anthropocene.

8- Jacob, J., Thibault, A., Fougère, L., Thibault, A., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Ardito, L., Augustin, L., Destandau, E., Di Giovanni, C. Evolution of licit and illicit drugs since 1980 from a sedimentary archive in the sewer network of Orléans (France). Anthropocene.

IV. Publications de rang B

2012

1- Zocatelli, R., Bernardes, M., Turcq, B., Campello Cordeiro, R., Albuquerque, A.L., Sifeddine, A., Jacob, J., Boussafir, M., 2012. Composição da matéria orgânica lacustre como ferramenta na reconstrução paleoambiental na Lagoa do Caçó, Maranhão, Brasil. Geochimica Brasiliensis, Ouro Preto, 26, 67-78.

2- Jacob, J., 2012. History of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps) as recorded by a twin sedimentary record of miliacin. Quaternary International 279, 218-219.

2008

3- Guido, A., Jacob, J., Gautret, P., Laggoun-Défarge, F., Mastandrea, A. et Russo, F., 2008. Does the Messinian pre-evaporitic Calcare di Base Formation represent a bacterial induced deposit? Geologica Romana.

4- Gauthier, E., Richard, H., Magny, M., Peyron, O., Arnaud, F., Jacob, J., Marguet, A., Billaud, Y., 2008. Le lac du Bourget (Savoie, France) à l'Âge du Bronze : végétation, impacts anthropiques et climat. Actes du 131ème congrès du CTHS, Grenoble, 2006. Editions du CTHS-Presses Universitaires Franc-Comtoises.

5- Bouloubassi, I., Sicre, M.A., Ezat, U., Gondry, G., Jacob, J., Azzoug, M., 2008. Linking ocean variabilty to phytoplankton changes over the last 2000 years off N. Iceland. *Eos Trans. AGU, 89*(53), Fall Meet. Suppl., Abstract PP51b-1494.

2002

6- Jacob, J., Disnar, J-R., Boussafir, M. et Sifeddine, A., 2002. Pentacyclic Triterpene Methyl Ethers (PTME): a new class of biomarkers to trace Gramineae in tropical settings? Ancient Biomolecules. Vol. 4/3, pp. 119.

2006

7- Jacob, J., Paris, F., Miller, M.A., Tang, P., Monod, O., Duverger, E., Monsigny, M., Trichet, J., 2006. Chitinozoan chemical composition: new insights from organic geochemistry and molecular biology. In: Deck, J., Brocke, R., Daskova, J. and Fatka, O. (Eds.), Palaeozoic palynology in space and time: CIMP General Meeting 2006, September 2-6, 2006. Institute of Geology, Academy of Science, Prague. Book of abstracts, p. 30-31.

2004

8- Jacob, J., 2004. Water balance over the last 20,000 yrs in North-Eastern Brazil. Insights from the δD variations of fatty acids from a lacustrine series (Lagoa do Caçó). EAOG Newsletter 18 - Travel Scholarship Report.

V. Communications à congrès

1. Communications orales à congrès

2018

1- Jacob, J., Simonneau, A., Thibault, A., Thiébault, T., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Ardito, L., Fougère, L., Destandau, E., Morio, C., 2018. Observation et rétro-observation du milieu urbain par des approches paléoenvironnementales exploitant les polluants comme traceurs. Cas du réseau d'assainissement d'Orléans Métropole. Séminaire ResMO, Trégastel, 4-7 février 2018.

2- Jacob, J., Simonneau, A., Thibault, A., Thiébault, T., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Ardito, L., Fougère, L., Destandau, E., Morio, C., 2018. Observation et rétro-observation du milieu urbain par des approches paléoenvironnementales exploitant les polluants comme traceurs. Cas du réseau d'assainissement d'Orléans Métropole. Colloque Q11 – Au centre des Enjeux, Orléans, 13-15 février 2018.

3- Simonneau, A., Jacob, J., Cavelan, A., Etourneau, S., Di Giovanni, C., Garel, E., Gautret, P., Gumiaux, C., Huneau, F., Le Milbeau, C., Motelica-Heino, M., Pasqualini, V., 2018. Dynamique sédimentaire récente et eutrophisation de la lagune de Biguglia : nature, origine et distribution des apports sédimentaires. Colloque Q11 – Au centre des Enjeux, Orléans, 13-15 février 2018.

4- Di Giovanni, C., Copard, Y., Chassiot, L., Gumiaux, C., Pierre, D., Sizaret, S., Mathys, N., Le Milbeau, C., Simonneau, A., Jacob, J., 2018. Anthropisation et érosion des bassins versants : la revégétalisation des terres noires en moyenne Durance. Colloque Q11 – Au centre des Enjeux, Orléans, 13-15 février 2018.

5- Jacob, J., Simonneau, A., Thibault, A., Thiebault, T., Diacre, A., Le Milbeau, C., Boscardin, R., DiGiovanni, C., Fougère, L., Destandau, E., Morio, C., 2018. Archivage sédimentaire dans le réseau d'assainissement unitaire d'Orléans : une simple question de contributions respectives eaux usées / eaux pluviales ? 26ème Réunion des Sciences de la Terre, Lille, 22-26 octobre 2018.

6- Quesnel, F., Iakovleva, A., Fléhoc, C., Baele, J.M., Smith, T., Roche, E., Bourdillon, C., Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Breillat, N., Storme, J.Y., 2018. Lithostratigraphie des faciès sparnaciens du Bassin parisien. Révision de la nomenclature grâce aux nouvelles données sédimentaires, minéralogiques, chémo et bio-stratigraphiques. 26ème Réunion des Sciences de la Terre, Lille, 22-26 octobre 2018.

7- Jacob, J., Simonneau, A., Renaud, F., Bajard, M., Messager, E., Poulenard, J., Giguet-Covex, C., Arnaud, F., Doyen, E., Sabatier, P., Etienne, D., Malet, E., Fanget, B., Le Milbeau, C., 2018. Calendrier de la diffusion du millet dans les Alpes déterminé par la première occurrence de miliacine dans les sédiments lacustres. 26ème Réunion des Sciences de la Terre, Lille, 22-26 octobre 2018.

8- Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Develle, A.L., Giguet-Covex, C., Jacob, J., Crouzet, C., David, F., Pignol, C., Arnaud, F., 2018. Modifications de l'évolution des sols de montagne dans l'Anthropocène. Journées d'Etude des Sols, Rouen, 9-12 juillet 2018.

9- Diacre, A., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2018. Nature and origin of pollutants from transports in an anthropic archive. The Chambre à Sable decantation tank in Orléans. 4ème réunion des Géochimistes Organiciens Francophones, Lyon, 10-11 juillet 2018.

10- Terwilliger, V., Eshetu, Z., Power, M., Looby, E., Jacob, J., Le Milbeau, C., Adderley, P., Lin, Y., Fogel, M., D'Andrea, A.C., 2018. Challenges to assessing the resilience to environmental change of the Horn of Africa's ancient civilisations. AFQUA, Nairobi, 14-22 juillet 2018.

11- D'Andrea, A.C., Terwilliger, V.J., Walder-Hodge, C., Eshetu, Z., Power, M., Adderley, P., Beldados, A., Wolderkiros, H., Fogel, M., Harower, M., Perlingieri, C., Jacob, J., 2018. Bridging the past and present: historical ecology and human environmental dynamics in the Horn of Africa. 24th biannual meeting of the Society of Africanist Archaeologist, Toronto, 18-21 juin 2018.

2017

12- Jacob, J., 2017. Golden Spike. Dynamique des polluants durant l'Anthropocène et métabolismes urbains. Journée GRIME, 6 novembre 2017, ISTO.

13- Jacob, J., 2017. Golden Spike. Carottages dans La Chambre à Sable d'Orléans. ANF Carottages lacustres, 17-20 octobre 2017.

2016

14- Dubois, N., Jacob, J., 2016. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives. 14th Swiss Geoscience Meeting, Geneva 2016.

15- Ghirardi, J., Bauer, H., Jacob, J., Benoit, R., Quesnel, F., Le Milbeau, C., Huguet, A., Di Giovanni, C., 2016. Le refroidissement Eocène-Oligocène sur le domaine continental : impacts et mécanismes. 3ème réunion des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique, Poitiers, 7-8 juillet 2016.

16- Khalifé, D., Jacob, J., Girard, X., Boscardin, R., Bordin, T., 2016. Impacts des conditions d'irrigation et des variétés sur la composition moléculaire et isotopique (δD) des lipides de maïs. 3ème réunion des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique, Poitiers, 7-8 juillet 2016.

17- Maisonhaute, E., Jacob, J., Omodéo Salé, S., Michel, P., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., 2016. Etude des cortèges moléculaires associés aux dépôts de la formation de Mannville (Crétacé inférieur, Alberta du Sud, Canada) en tant que marqueurs des environnements de dépôts de la matière organique terrestre. 3ème réunion des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique, Poitiers, 7-8 juillet 2016.

18- Réty, M., Jacob, J., Le Milbeau, C., Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2016. Quels contrôles agissent sur la variabilité temporelle des polluants organiques dans les eaux usées ? Cas de la station d'épuration de La source (Loiret, France). 3ème réunion des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique, Poitiers, 7-8 juillet 2016.

19- Jacob, J., Simonneau, A., 2016. Diffusion of human practices in Europe: timing and impacts. Highlights and perspectives from organics in soils and sediments. Pages Workshop, Chambéry, 30 mai-1er juin 2016.

20- Jacob, J., Dubois, N., 2016. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives. Pages Workshop, Chambéry, 30 mai-1er juin 2016.

21- Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Develle, A.L., David, F., Giguet-Covex, C., Jacob, J., Boscardin, R., Couzet, C., Arnaud, F., 2016. Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene. Pages Workshop, Chambéry, 30 mai-1er juin 2016.

22- Lesot, P., Berdagué, P., Jacob, J., 2016. Determination of the molecular (D/H) isotopic profile by anisotropic NAD 2D-NMR: Exploiting the analytical wealth of oriented solvents. 8th International Symposium on Isotopomers, Nantes, 3-6 octobre 2016.

23- Thibault, A., Jacob, J., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2016. Sedimentology, stratigraphy and chronology of a decantation tank in the sewer network of Orléans (France): new perspectives on the Anthropocene. Séminaire "Dating the ANThropocene in Environmental archives", DANTE, Toulouse, 18-21 octobre 2016.

24- Thibault, A., Jacob, J., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2016. Sédimentologie, stratigraphie et chronologie du remplissage d'un bassin de décantation du réseau d'assainissement de l'agglomération d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

25- Quesnel, F., Baele, J.M., Iakovleva, A., Fléhoc, C., Smith, T., Roche, E., Bourdillon, C., Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Breillat, N., Storme, J.Y., Yans, J., Dupuis, C., 2016. Le PETM dans le bassin de Paris : enregistrement exceptionnel, connaissances renouvelées, mais encore des questions. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

26- Réty, M., Jacob, J., Thiébault, T., Le Milbeau, C., Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2016. Evolution quotidienne des flux de contaminants émergents dans les eaux usées en amont de la

station d'épuration de La Source (Orléans, France). Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

27- Le Milbeau, C., Jacob, J., 2016. Origine, état de préservation et potentiel d'archivage de la matière organique préservée dans les sédiments de deux lacs urbains artificiels d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

28- Cavelan, A., Simonneau, A., Jacob, J., Le Milbeau, C., Belli, A., Di Giovanni, C., Gumiaux, C., Gautret, P., Garel., E, Huneau, F., Motelica-Heino, M., Pascualini, V., 2016. Dynamique sédimentaire récente et eutrophisation de la lagune de Biguglia : nature, origine et distribution des apports sédimentaires. Réunion des Sciences de la Terre, Caen 24-28 octobre 2016.

29- Jacob, J., Simonneau, A., Thibault, A., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., Ardito, L., Morio, C., 2016. Chronologie du dépôt de sédiments dans un bassin de décantation du réseau d'assainissement d'Orléans. Journée Thématique REFRAIN – 14C. 21 novembre 2016, Orsay.

30- Berdagué, P., Jacob, J., Terwilliger, V., Le Milbeau, C., Lesot, P., 2016. Conditions environnementales, biosynthèses, diagenèse : contribution analytique de la RMN 2H en milieu anisotrope. Atelier Climats-Impacts, Orsay, 15-16 novembre 2016.

2015

31- Lesot et al., 2015. Contribution de la RMN 2D DAN anisotrope à la détermination du profil isotopique (D/H)i de biomarqueurs: étude de la Miliacine. Colloque RMN GBP-Ile de France, 28-29 mai, Gif-sur-Yvette.

32- Jacob, J., Lavrieux, M., Simonneau, A., Zocatelli, R., Guillemot, T., 2015. Biomarqueurs moléculaires de l'anthropisation : simples traceurs, indicateurs de pollutions, ou polluants ? 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

33- Cerubini, R., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Galop, D., Jacob, J., Zocatelli, R., Di Giovanni, C., Mazier, F., 2015. Cortèges moléculaires liés aux activités pastorales: Tentative de calibration quantitative dans les sédiments de la tourbière Orry de Théo (Observatoire Homme Milieu Haut Vicdessos, Pyrénées ariégeoises, France). 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

34- Thibault, A., Jacob, J., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Motelica, M., Di Giovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.L., 2015. Signification temporelle des accumulations sédimentaires dans le réseau d'assainissement de l'agglomération d'Orléans - Approches sédimentologique et géochronologique. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

35- Le Milbeau, C., Jacob, J., Simonneau, A., Chassiot, L., Lecocq, J., Cerubini, R., Thibault, A., De Oliveira, T., Priou, M., Zocatelli, R., Di Giovanni, C., 2015. Méthoxyserratènes : nouvel outil permettant de suivre l'évolution des forêts de conifères dans le bassin versant. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

36- Ghirardi, J., Bauer, H., Jacob, J., Benoit, R., Quesnel, F., Le Milbeau, C., Huguet, A., Di Giovanni, C., 2015. Le refroidissement Eocène-Oligocène sur le domaine continental : impacts et mécanismes. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

37- Berdagué, P., Jacob, J., Terwilliger, V., Le Milbeau, C., Lesot. P., 2015. Contribution de la RMN 2D DAN anisotrope à la détermination du profil isotopique (D/H)i dans des biomarqueurs: étude de la miliacine. Colloque RMN GBP-Ile de France, Gif-sur-Yvette, mai 2015.

38- Ghirardi, J., Jacob, J., Huguet, A., Bauer, H., Le Milbeau, C., Di Giovanni, C., Quesnel, F., 2015. Evolutions du climat et de la végétation lors de la transition Eocène-Oligocène en domaine continental : le cas du bassin de Rennes. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

39- Thibault, A., Jacob, J., Simonneau, A., Le Milbeau, C., Motelica, M., Thiebault, T., Di Giovanni, C., 2015. Quels marqueurs du métabolisme urbain recèlent les accumulations sédimentaires dans les réseaux d'assainissement ? Cas de l'agglomération orléanaise. 15ème congrès français de sédimentologie, Chambéry, 13-15 octobre 2015.

40- Jacob, J., Simonneau, A., Bossard, N., Le Milbeau, C., Lavrieux, M., Motuzaite-Matuceviciute, G., Terwilliger, V., Lesot, P., Poissonnier, B., Billaud, Y., 2016. Miliacin from broomcorn millet. A fossil molecule of multiple interests for archaeologists and paleoenvironmentalists. Colloque de clôture de l'ANR ORIMIL «Millet Cultivation in the Caucasus from the 6th to the 2nd mill BC: Origin and Development », Lyon, 4-5 novembre 2015.

2014

41- Terwilliger, V.J., Eshetu, Z., Adderley, W.P., Jacob, J., Fogel, M., Kassa, T.G., 2014. Palaeoenvironmental Change and the Rise and Fall D'MT and Aksum in Northern Ethiopia: How an unambiguous proxy for rainfall can improve interpretations of micromorphological and botanical data. 2014. Open PAGES Focus 4 Workshop, February 3-7, Louvain, Belgique.

42- Terwilliger, V. J., Eshetu, Z., Zech, R., Jacob, J., Fogel, M., 2014. Large paleoenvironmental insights from tiny molecules that "don't do anything": lessons from French and Ethiopian deposits. Association of American Geographers Meeting, Tampa, Spring 2014.

43- Guillemot, T., Zocatelli, R., Jacob, J., Gauthier, E., Massa, C., Bichet, V. , Le Milbeau, C., 2014. Evolution des activités agropastorales autour du Lac Igaliku (Sud du Groenland) sur les deux milles dernières années. 2ème Réunion des Géochimistes Organiciens Francophones, 3-4 juillet 2014, Le Bourget-du-Lac, France.

44- Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Dupuis, C., Le Milbeau, C., Baudin, F., Fléhoc, C., Breillat, N., Quesnel, F., 2014. Changements hydrologiques et environnementaux dans le Noyonnais à la limite Paléocène-Éocène (Oise). 2ème Réunion des Géochimistes Organiciens Francophones, 3-4 juillet 2014, Le Bourget-du-Lac, France.

45- Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, Y., Sebilo, M., Jacob, J., Derenne, S., Baudin, F., 2014. Caractérisation de la matière organique de la coupe continentale de Taskomirsaï (Jurassique inférieur, Kazakhstan). Approche moléculaire et implications environnementales. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

46- Thibault, A., Jacob, J., Quesnel, F., Le Milbeau, C., Bossard, N., 2014. Diversité et évolution des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments du Maar de Menat (Paléocène). 2ème Réunion des Géochimistes Organiciens Francophones, 3-4 juillet 2014, Le Bourget-du-Lac, France.

47- Bossard, N., Jacob, J., Zocatelli, R., Le Milbeau, C., Madani, M., Thomas, L., Essayan, V., Laggoun-Défarge, F., 2014. La base de données collaborative des biomarqueurs moléculaires de l'OSUC. 2ème Réunion des Géochimistes Organiciens Francophones, 3-4 juillet 2014, Le Bourget-du-Lac, France.

48- Thibault, A., Jacob, J., Quesnel, F., Le Milbeau, C., Bossard, N., 2014. Diversité et évolution des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments du Maar de Menat (Paléocène). Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

49- Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, Y., Sebilo, M., Jacob, J., Derenne, S., Baudin, F., 2014. Caractérisation de la matière organique de la coupe continentale de Taskomirsaï (Jurassique inférieur, Kazakhstan). Approche moléculaire et implications environnementales. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

50- Ghirardi, J., Jacob, J., Huguet, A., Bauer, H., Le Milbeau, C., Chateauneuf, J.J., Quesnel, F., Di Giovanni, C., 2014. A unique high resolution record of climate and vegetation changes during the EOT. The CDB1 core, Rennes Basin, France. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

51- Guillemot, T., Jacob, J., Zocatelli, R., Gauthier, E., Massa, C., Bichet, V., Le Milbeau, C., 2014. Evolution of agropastoralism around Lake Igaliku (Southern Greenland) during the last two millenia through molecular biomarkers. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

52- Terwilliger, V.J., Eshetu, Z., Adderley, W.P., Jacob, J., Fogel, M., Gebru Kassa, T., 2014. Palaeoenvironmental Change and the Rise and Fall D'MT and Aksum in Northern Ethiopia: How an unambiguous proxy for rainfall can improve interpretations of micromorphological and botanical data. PAGES Focus 4 Workshop, 3-7 Février 2014, Louvain, Belgique.

53- Guillemot, T., Jacob, J., Zocatelli, R., Gauthier, E., Massa, C., Bichet, V., Le Milbeau, C., 2014. Evolution of agropastoralism around Lake Igaliku (Southern Greenland) during the last two millenia through molecular biomarkers. 9ème Conférence de Paléobotanique et Palynologie Européenne, 26-31 août 2014, Padoue, Italie.
54- Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, J., Storme, J.Y., Sebilo, M., Derenne, S., Jacob, J., Baudin, F., 2014. Paleonitrogen: Use of stable nitrogen isotopes from terrestrial organic matter as a new paleoclimatic proxy for pre-quaternary time. EGU 2014, Vienne, Autriche.
55- Ghirardi, J., Jacob, J., Huguet, A., Bauer, H., Le Milbeau, C., Chateauneuf, J.J., Quesnel, F., Di Giovanni, C., 2014. A unique high resolution record of climate and vegetation changes during the EOT. The CDB1 core, Rennes Basin, France. Climate and Biotic Events of the Paleogene. 1-6 Juillet 2014, Ferrara, Italie.

2013

56- Schnyder, J., Tramoy, R., Yans J., Storme, J.-Y., Nguyen Tu, T.T.[3], Sebilo, M., Derenne, S., Jacob, J., Baudin, F.,2013. Les isotopes de l'azote des matières organiques terrestres : un nouvel outil paléoclimatique pour le Jurassique? Congrès sur le Jurassique.
57- Jacob, J., 2013. Projet PalHydroMil : Reconstructions paléohydrologiques à partir du dD de lipides produits par les végétaux supérieurs. Calibration, validation et application aux variations hydrologiques dans les Alpes pendant l'âge du Bronze. Séminaire ANR – Toulouse.
58- Zocatelli, R., Moreira-Turcq, P., Jacob, J., Boussafir, M., Cordeiro, R., Turcq, B., 2013. Mise en évidence de changements de couvert végétal dans la plaine d'inondation du Curuai (Amazonie Centrale) pendant l'Holocène. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
59- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Dupuis, C., Le Milbeau, C., Flehoc, C., Baudin, F., Breillat, N., Quesnel, F., 2013. Conséquences du maximum thermique de la limite Paléocène-Eocène sur les environnements continentaux du bassin de Paris. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
60- Tramoy, R., Scnhyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, J., Storme, J.Y., Sebilo, M., Derenne, S., Jacob, J., Baudin, F., 2013. PaléoNitrogen : L'utilisation des isotopes stables de l'azote des matières organiques fossiles comme nouveau marqueur paléoclimatique – Premiers résultats. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
61- Simonneau, A., Jacob, J., Chapron, E., DiGiovanni, C., Bossard, N., Le Milbeau, C., Arnaud, F., Magny, M., 2013. Pratiques agricoles et diffusion du millet cultivé dans l'arc alpin : Une approche moléculaire (Lac Ledro, Italie et Lacs Le Bourget et Paladru, France). Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
62- Lavrieux, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Le Milbeau, C., Miras, Y., Andrieu-Ponel, V., 2013. Le cannabinol sédimentaire, traceur de l'histoire du rouissage du chanvre. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
63- Zocatelli, R., Jacob, J., Le Milbeau, C., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Rousseau, J., 2013. La variabilité spatiale des lipides du sol dans une tourbière : reflet de la biodiversité. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
64- Zocatelli, R., Disnar, J.R., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2013. Les stérols et les acides biliaires dans les géo-archives : outils pertinents pour les études archéologiques ? Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
65- Arnaud, F., Giguet-Covex, C., Sabatier, P., Doyen, E., Simonneau, A., et les membres du projet Aphrodyte. Modification régionale du cycle de l'érosion (2ème s. av. 4ème s. ap. J.C.) dans les Alpes nord-occidentales : une définition locale de l'Anthropocène ? Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.
66- Ghirardi, J., Bauer, H., Jacob, J., Le Milbeau, C., Benoit, R., DiCarlo, I., Quesnel, F., DiGiovanni, C., 2013. Origine des facies laminés dans les sédiments lacustres éocène-oligocène du graben de Rennes. Approche minérale, organique et cyclostratigraphique. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.

67- Ghirardi, J., Jacob, J., Le Milbeau, C., Bauer, H., Quesnel, F., Chateauneuf, J.J., Flehoc, C., Schnyder, J., Fozzani, J., DiGiovanni, C., 2013. Evolution des écosystèmes continentaux à la transition Eocène-Oligocène. Apport de la matière organique des sédiments lacustres du Bassin de Rennes. Congrès de l'Association Française de Sédimentologie, Paris, octobre 2013.

68- Ghirardi, J., Jacob, J., Le Milbeau, C., Bauer, H., Quesnel, F., DiGiovanni, C., 2013. Successions végétales et évolution des conditions hydrologiques à la transition Eocène-Oligocène. Journées Jeunes Chercheurs de la Société Française des Isotopes Stables, 28-30 octobre 2013, Dunkerque.

2012

69- Terwilliger, V.J., Eshetu, Z., Alexandre, M., Adderley, P., Disnar, J.R., Jacob, J., Fogel, M., 2012. What do the Hydrogen and Carbon Isotopic Compositions of Crusgallin Have to do with the Rise and Fall of Civilizations in the Northern Ethiopian Highlands? Association of American Geographers meeting, Février 2012, New York, USA.

70- Jacob, J., Bossard, N., Billaud, Y., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Chapron, E., Arnaud, F., 2012. Un contrôle climatique et démographique sur les concentrations en miliacine dans les sédiments du Lac du Bourget durant l'âge du Bronze ? Colloque Q8, Clermont-Ferrand, 29 février-2 mars 2012.

71- Bossard, N., Jacob, J., Bariac, T., Terwilliger, V., Le Milbeau, C., Biron, P., Richard, P., Béchard, M., Vergès, E., 2012. Pertinence du dD de la miliacine pour les reconstitutions paléohydrologiques. 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans.

72- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Le Milbeau, C., Baudin, F., Quesnel, F., 2012. Changements hydrologiques et environnementaux à la limite Paléocène-Éocène dans la zone du Cap d'Ailly (Seine Maritime). 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans.

73- Guillemot, T., Jacob, J., Pierre, D., 2012. Distribution spatiale des biomarqueurs moléculaires dans les sols en relation avec les cultures de l'Age du Bronze et les végétations actuelles. Exemple de la Combe aux Moines (Brison Saint Innocent, Savoie). 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans. (exposé annulé).

74- Lavrieux, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Le Milbeau, C., 2012. Du chanvre aux pissenlits, les cortèges moléculaires de végétaux supérieurs témoignent de l'évolution de l'occupation des sols autour du Lac d'Aydat. 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans.

75- Py-Circan, C., Jacob, J., Cazaunau, M., Le Milbeau, C., Bossard, N., Mellouki, A., 2012. Impact de la photodégradation sur le δD des triterpènes pentacycliques et de leurs dérivés. 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans. (exposé annulé).

76- Sauze, J., Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2012. Spécificité de la miliacine vis-à-vis de Panicum miliaceum. 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans. (exposé annulé).

77- Simonneau, A., Chapron, E., DiGiovanni, C., Bossard, N., Le Milbeau, C., Jacob, J., 2012. Pétrographie organique quantitative et biomarqueurs moléculaires au sein des archives lacustres : outils d'identification des activités anthropiques holocènes du piedmont Alpin (Lac de Paladru, France et Lac Ledro, Italie). 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans.

78- Zocatelli, R., Jacob, J., Le Milbeau, C., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Volant, C., Rousseau, C., 2012. Relations entre diversité végétale et cortèges moléculaires dans le cas d'une tourbière envahie par des végétaux vasculaires. 1ère Réunion annuelle des Géochimistes Organiciens français, 30-31 août 2012, Orléans.

79- Simonneau, A., Chapron, E., DiGiovanni, C., Bossard, N., Doyen, E., Wirth, S., Vannière, B., Millet, L., Tachikawa, K., Bard, E., Le Milbeau, C., Jacob, J., Gilli, A., Anselmetti, F., Desmet, M., Arnaud, F., Magny, M., 2012. Mise en évidence de l'anthropisation au sein d'archives

lacustres issues du piedmont Alpin à partir de signaux minéraux et organiques (Lac de Paladru, France et Lac Ledro, Italie). Journées Scientifiques Climat et Impacts, 19-20 novembre 2012, Orsay.

2011

80- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Yans, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2011. Paleocene-Eocene Thermal Maximum consequences on continental environments. Insights from the evolution of organic matter in the Vasterival section (Paris Basin, France). CBEP, Salzburg, Autriche, 2011.

81- Lavrieux, M., Jacob, J., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Zocatelli, R., Bréheret, J.G., Masuda, K., 2011. First detection of triterpenyl acetates in soils: sources and potential as new palaeoenvironmental biomarkers. IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

82- Perga, M.E., Jacob, J., Jenny, J.P., Pignol, C., Reyss, J. L., and Arnaud, F., 2011. Changes in the origins of organic carbon sustaining the pelagic food chain during a century of human perturbations on two deep sub-alpine lakes. ASLO 2010 - Aquatic Science Meeting: Limnology and Oceanography, 13-18 février 2011, San Juan, Porto Rico.

83- Jacob, J., Bossard, N., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Billaud, Y., Chapron, E., Gérard, J., Poulenard, J., Soltysiak, L., Perga, M.E., 2011. La culture du millet autour du Lac du Bourget durant l'âge du Bronze. "Economie alimentaire et alimentation à l'Age du Bronze en Europe : aspects pluridisciplinaires", 8-9 novembre 2011 à la Maison Méditerranéenne des Sciences de l'Homme (MMSH) d'Aix en Provence.

84- Bossard N., Jacob J., Bariac T., Terwilliger V., Le Milbeau C., Biron P., Richard P., Lallier-Vergès E., 2011. Fractionation of hydrogen isotopes between source water and pentacyclic triterpenes in *Panicum miliaceum* grown under controlled conditions. Journées Jeunes Chercheurs de la SFIS, 12-14 octobre 2011, Brest.

85- Disnar, J.R., Lavrieux, M., Bréheret, J.G., Chapron, E., Jacob, J., Arnaud, F., Reyss, J.L., Trément, F., 2011. L'enregistrement sédimentaire du lac d'Aydat (Puy-de Dôme) : conséquences cumulées de l'activité humaine et de la paléohydrologie. ASF 2011, Dijon.

2010

86- Mignot, J., Sicre, M.A., Khodri, M., Ezat, U., Jacob, J., Hall, I., Servonnat, J., Truong, M.X., 2010. Atlantic gyres variability during the last millennium. Geophysical Research Abstracts, 12, 8634.

87- Nguyen Tu, T.T., Egasse, C., David, B., Derenne, S., Mendez-Millan, M., Zeller, B., Derrien, D., Jacob, J., Hatté, C., 2010. Molecular and isotope characterization of soil lipids along a savannah (C4)/eucalyptus (C3) chronosequence (Pointe-Noire, Congo). Organic matter stabilization and ecosystem functions, Giens, 19-23 septembre 2010.

88- Dupuis, C., Quesnel, F., André, M., Breillat, N., Pellenard, P., Vennin, E., Magiocalda, R., Storme, J.Y., Roche, E., Iakovleva, A.I., De Conninck, J., Garel, S., Schynder, J., Jacob, J., Boussafir, M., Smith, T., Iacumin, P., Yans, J., 2010. Towards a detailed paleogeographic reconstruction of the Paris Basin during the Late Paleocene and the Early Eocene. Strati 2010, 4ème Congrès Français de Stratigraphie, 30 août-2 septembre, Paris, France.

89- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Yans, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2010. Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) consequences on continental environments. Insights from the evolution of organic matter (OM) in the Vasterival section (Paris Basin, France). Strati 2010, 4ème Congrès Français de Stratigraphie, 30 août-2 septembre, Paris, France.

90- Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., Boscardin, R., Lallier-Vergès, E., 2010. Variabilité du dD moléculaire à l'échelle d'un plant et d'une parcelle : Cas de la miliacine dans le millet commun (Panicum miliaceum). 6ème Congrès de la Société Française des Isotopes Stables, 26-29 octobre 2010, Toulouse, France.

91- Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Yans, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2010. Evolution of hydrological conditions during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) in continental settings as evaluated from the dD of higher plant

biomarkers in the Vasterival section (Paris Basin, France). 6ème Congrès de la Société Française des Isotopes Stables, 26-29 octobre 2010, Toulouse, France.

92- Sicre, M.A., Massé, G., Jacob, J., Ezat, U., Truong, M.X., Hall I., Mignot, J., Khodri, M., Knudsen, K.L., Eiríksson, J. Decadal variablity in the sub-polar Atlantic ocean over the last 2000 years. International Polar Year Conference, Oslo, juin 2010.

93- Jacob, J., Disnar, J.R., Le Milbeau, C., Zocatelli, R., Lavrieux, M., Bossard, N., Laggoun-Défarge, F., 2010. Les molécules fossiles : outil de diagnostic des environnements naturels et supports d'innovation. Forum RESONAT-DREAM, Orléans, 14 décembre 2010.

2009

94- Disnar, J.R., Jacob, J., Lavrieux, M., 2008. Marqueurs organiques et impact des activités humaines sur la sédimentation lacustre récente du lac d'Aydat (Puy-de-Dôme). CILO, Rouen, Octobre 2008.

95- Jacob, J., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., Chapron, E., 2009. Evolution haute résolution de la culture du millet et de l'érosion des sols durant l'âge du Bronze dans les sédiments du Lac du Bourget (Savoie). Séminaire "Matières Organiques et Environnement", Sainte Maxime, 25-29 Janvier 2009.

96- Quesnel et al., 2009. Reconstructing the PALEOCENE / EOCENE continental paleosurface in and around the Paris and adjacent basins: new insights for paleogeographic, geodynamic and climatic studies. ASF 2009, Rennes.

97- Lavrieux, M., Disnar, J.R., Jacob, J., Bréheret, J.G., 2009. Les Biomarqueurs d'occupations des sols passées. Exemple du bassin-versant du lac d'Aydat (Massif Central, France). ASF 2009, Rennes.

98- Disnar J.-R., Gouelibo N., Jacob J., Billaud Y., Zocatelli R., 2009. Indicateurs moléculaires de présence et d'activité anthropique dans un enregistrement sédimentaire prélevé à l'aplomb d'un paléosite d'occupation (Chindrieux / Châtillon, lac du Bourget, Savoie). 12e Congrès Français de Sédimentologie, 25-31 octobre 2009, Rennes.

99- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A., Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? EGU, Vienne, avril 2009.

100- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A., Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? Atelier Climat et Impacts, Orsay, 5-6 novembre 2009.

2007

101- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Vergès, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M., 2007. A new sedimentary molecule tracks agriculture history. A new sedimentary biomarker tracks millet cultivation in the Alps during the last 6000 yrs. ILIC 2007, Barcelone, 11-14 juillet 2007.

102- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Vergès, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M., 2007. Millet cultivation history in the Alps during the last 6000 yrs as revealed by a sedimentary biomarker. IMOG 2007, Torquay, 9-14 septembre 2007.

103- Arnaud, F., Berger, J.F., Billaud, Y., Chapron, E., David, F., Debret, M., Desmet, M., Disnar, J.R., Gaucher, G., Gauthier, E., Jacob, J., Lallier-Vergès, E., Magny, M., Marguet, A., Millet, L., Perette, Y., Revel-Rolland, M., Richard, H., Salvador, P.G., Serralongue, J., Thouveny, N., 2007. Lake, river, peat and speleothem records of Holocene climate and land-use in the Alps: the interdisciplinary research project "Aphrodyte". ILIC 2007, Barcelone, 11-14 juillet 2007.

104- Disnar, J.R., Jacob, J., Ogier, S., Maman, O., Stefanova, M., Guillet, B., 2007. Distortion of the (paleo) environmental message recorded by molecular organic markers: example of an eutrophic lake (Aydat, Puy de Dôme, France). ILIC 2007, Barcelone, 11-14 juillet 2007.

105- Disnar J. R., Jacob J., Morched-Issa M., Arnaud F., Lottier N., Schulz J. et. Laplace-Dolonde A., 2007. Enregistrement de paléofluctuations hydrologiques dans des séries tourbeuses : le

remplissage holocène du marais de Chautagne, entre Rhône et lac du Bourget. ASF 2007, Caen, 22-25 octobre 2007.

106- Jacob, J., Vasic, A., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Verges, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M., 2007. Culture du millet et érosion des sols depuis l'Age du Bronze autour du Lac du Bourget : apport des lipides sédimentaires. ASF 2007, Caen, 22-25 octobre 2007.

107- Disnar J. R., Stefanova M., Jacob J., Bréheret J.-G. & Macaire J.-J., 2007. Evolution du paléolac de Sarlième (Puy-de Dôme) et de son environnement durant l'Atlantique : à la recherche d'indices d'activité anthropique. ASF 2007, Caen, 22-25 octobre 2007.

108- Sicre, M.-A., Jacob, J., Ezat, U., Rousse, S., Yiou, P., Labeyrie, L., Eiríksson, J., Knudsen, K.-L., Jansen, E., Turon, J.-L., 2007. Decadal variability of sea surface temperatures off North Iceland over the last 3200 years. EGU, Vienne (Autriche) avril 2007.

2006

109- Jacob, J., Paris, F., Miller, M.A., Monod, O., Duverger, E., Monsigny, M. et Trichet, J. Chitinozoan chemical composition: new insights from organic geochemistry and molecular biology. International Paleontological Congress, Pékin (Chine), 17-21 juin 2006.

110- Sifeddine, A., Khodri, M., Turcq, B., Cordeiro, R.C., Albuquerque, A.L.S., Jacob, J., Abrão, J.J., 2006. Hydrological changes during the Late-glacial times in northern Brazil inferred from sediments of Caço Lake. Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract PP31C-1762.

2005

111- Jacob, J., Sicre, M.A., Eiriksson, J., Knudsen, K.L., Jansen, E. et Turon, J.L., 2005. Decadal to multi-decadal variability of sea surface temperatures in the North Atlantic over the last 2000 yrs. EGU, Vienne (Autriche) avril 2005.

112- Eiríksson, J., Jacob, J., Jansen, E., Jiang, H., Kissel, C., Knudsen, K. L., Larsen, G., Rousse, S., Schulz, M., Sicre, M.-A., 2005. Application of Tephrochronology to the Dating of a Multi-proxy Study of High Resolution Marine Shelf Records at the North Atlantic Oceanographic Polar Front. EGU, Vienne (Autriche) avril 2005.

113- Jacob, J. Applications récentes de l'isotopie moléculaire à la quantification des variations climatiques et à l'estimation de leurs impacts sur les environnements anciens. Après-midi scientifiques de la Société Française des Isotopes Stables, Paris, 24 juin 2005.

114- Gurgel, M.H.C., Sifeddine, A., Vergès, E., Boussafir, M., Jacob, J. et Valdès, J. La matière organique sédimentaire de deux zones d'upwelling sud-américaines : évolution des marqueurs. Congrès de l'ASF, Giens, 11-13 octobre 2005.

115- Disnar, J.-R., Jacob, J., Ogier, S., Maman, O., Stefanova, M. et Guillet, B. Distorsion du message (paléo) environnemental enregistré par les marqueurs organiques moléculaires : Exemple d'un lac eutrophe (Aydat, Puy de Dome). Congrès de l'ASF, Giens, 11-13 octobre 2005.

116- Jacob, J., Huang, Y., Disnar, J.-R., Sifeddine, A. et Albuquerque, A.L.S. Estimation des variations d'humidité dans le nord-est du Brésil depuis 20000 ans au moyen du D/H de biomarqueurs moléculaires. Congrès de l'ASF, Giens, 11-13 octobre 2005.

117- Arnaud, F., Desmet, M., Chapron, E., Revel-Rolland, M., Debret, M., Magny, M., Richard, H., Millet, L., Disnar, J.R., Jacob, J., Noel, H. et Marguet, A. Signature détritique des changements environnementaux holocènes au pied des alpes : apports des carottages longs dans le Lac du Bourget. Congrès de l'ASF, Giens, 11-13 octobre 2005.

118- Sicre, M.-A., Ezat, U., Guimbaud, E., Jacob, J., Eiriksson, J., Knudsen, K.-L. et Jansen, E., 2006. Sub-decadal variability of sea-surface temperatures off the North Icelandic shelf during the 0-2 and 6-8,2 ka intervals. Geophysical Research Abstracts, 8, 02061.

119- Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Turcq, B., Jacob, J., Boussafir, J., Disnar, J-R. et Abrao, J.J., 2001. La sédimentation organo-minérale marqueur des changements environnementaux et climatiques au Nord-Est du Brésil (Lac Caço, Maranhão, Brésil) durant les 21,000 ans cal BP. ASF Orléans, 2001.

2004

120- Jacob, J., Disnar, J.-R., et Boussafir, M., 2004. Biomarqueurs et isotopie moléculaire dans les archives lacustres : acquis récents et perspectives d'application. Séance spécialisée de la Société Géologique de France : "Archives lacustres en domaine tempéré", 4 février 2004, Paris.

121- Jacob, J., 2004. Enregistrement et impacts des variations climatiques dans les écosystèmes lacustres : apport des biomarqueurs moléculaires et de leur composition isotopique. 47ème conférence de l'Association Française de Limnologie, Besançon, 5-8 juillet 2004.

122- Disnar, J.R., Ogier, S., Maman, O., Stefanova, M., Guillet, B. et Jacob, J., 2004. Quelle image la matière organique sédimentaire est elle susceptible de conserver de son environnement originel ? L'exemple d'un lac eutrophe : Aydat (Puy de Dôme, France). 47ème conférence de l'Association Française de Limnologie, Besançon, 5-8 juillet 2004.

123- Jacob, J., Disnar, J.R., Huang, Y., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2004. Deciphering past climates from ancient molecules preserved in lake sediments. 21ème congrès de la Société Française de Spectrométrie de Masse, Strasbourg, 14-17 septembre 2004.

2003

124- Jacob, J. Disnar, J.R., Boussafir, M., Ledru, M.-P., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2003. Onocerane I witnesses to dry climatic phases at the end of Last Glacial Maximum and during the Younger Dryas in Northern Brazil. 21st IMOG meeting, Cracovie (Pologne), 8-12 septembre 2003.

125- Boussafir, M., Foudi, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Sifeddine, A. et Albuquerque, A.L.S., 2003. Distribution et état de préservation de la matière organique sédimentaire des sédiments superficiels du Lac Caço (Marañhao, Brésil). Production/diagenèse organique précoce et remplissage sédimentaire lacustre. ASF Bordeaux, 2003.

126- Jacob, J. Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2003. Nouveaux Marqueurs moléculaires témoins des successions végétales en domaine tropical. Exemple du Lac Caço (Nord Est du Brésil) depuis le DMG. ASF Bordeaux, 2003.

2002

127- Sifeddine, A., Turcq, B., Albuquerque, A.L.S., Cardoso, A., Ledru, M-P., Jacob, J., Campello Cordeiro, R., Boussafir, M., Disnar, J-R. et Abrao, J.J., 2002. La sédimentation organo-minérale lacustre durant les 21,000 ans Cal BP (Lac Caço, Maranhão, Brésil). Implications environnementales et paléoclimatiques. Q3, 24-26 janvier 2002. Aix en provence. Livre des résumés, page 56.

2001

128- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2001. Enregistrement des variations paléoenvironnementales durant le Quaternaire récent en domaine intertropical (Lac Caço, Brésil) : Apports de la géochimie globale et moléculaire. ASF Orléans, 2001.

2. Affiches

2018

1- Jacob, J., Bariac, T., Fléhoc, C., Blessing, M., Zech, M., Fougère, L., Le Milbeau, C., Landais, A., Destandau, E., 2018. $\delta^{18}O$ de stérols et triterpénols par GC-irMS : Est-ce bien raisonnable ? Séminaire ResMO, Trégastel, 4-7 février 2018.

2- Wuillot, G., Coffinet, S., Huguet, A., Jacob, J., Le Milbeau, C., Williamson, D., Majule, A., 2018. Evolution des conditions hydrologiques et écologiques depuis 4500 ans dans le marécage de Kyambangunguru (Tanzanie). Colloque Q11 – Au centre des Enjeux, Orléans, 13-15 février 2018.

2017

3- Fougère, L., Thiebault, T., Réty, M., Jacob, J., Morio, C., Destandau, E., 2017. La dynamique quotidienne des polluants émergents en amont de station d'épuration par UHPLC/MRM. SMMAP, 3-5 octobre 2017, Marne-la-Vallée.

4- Dubois, N., Jacob, J., 2017. Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives. PAGES 5th OSM, Zaragoza, 9-13 mai 2017.

5- Thiébault, T., Réty, M., Jacob, J., Destandau, E., Fougère, L., Morio, C., 2017. Daily dynamics of emerging pollutants in a sewer network (région Centre, France). EGU, Vienne, 23-28 avril 2017.

6- Jacob, J., Bariac, T., Fléhoc, C., Blessing, M., Zech, M., Le Milbeau, C., Landais, A., Destandau, E. Compound-specific $\delta^{18}O$ of Triterpenols: rationale, first results and issues. Goldschmidt Conference, Paris, 13-18 août 2017.

7- Thibault, A., Jacob, J., Simonneau, A., Le Milbeau, C., DiGiovanni, C., Sabatier, P., Reyss, J.M., Ardito, L., Morio, C. Organic geochemistry of Anthropocene sediments in the sewer network of Orléans (France). Goldschmidt Conference, Paris, 13-18 août 2017.

8- Bagard, M.L., Jacob, J., Dickson, A.J., Disnar, J.R., Le Milbeau, C., Davies, M.K., Cohen, A.S., 2017. Uranium isotope composition of Eocene marine sediments: Does organic matter? Goldschmidt Conference, Paris, 13-18 août 2017.

2015

9- Tramoy, R., Schnyder, J., Nguyen Tu, T.T., Yans, J., Jacob, J., 2015. Paleoclimatic changes at the Pliensbachian-Toarcian transition recorded by δD of n- alkanes and δ15N org in a continental section of central Asia. EGU 2015, Vienne, avril 2015.

10- Simonneau, A., Galop, D., Cérubini, R., Jacob, J., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2015. Pastoral activities and soil erosion processes: calibration and confrontation of organic and minerogenic markers from Pyrenean archives (Orry de Théo and Troumouse peat bogs). IMOG 2015, Prague.

11- Jacob, J., Priou, M., Le Milbeau, C., 2015. Comparative analysis of molecular biomarkers in the sediments of two artificial urban lakes in Orléans, France. IMOG 2015, Prague.

2014

12- Ghirardi, J., Benoit, R., Falzon, M.F., Jacob, J., Le Milbeau, C., Quesnel, F., Bauer, H., Di Giovanni, C., 2014. Distribution haute fréquence des biomarqueurs et origine des lamines sédimentaires : Une approche par ToF-SIMS sur des sédiments lacustres d'âge Eocène/Oligocène. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

13- Priou, M., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2014. Analyse comparée des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments de deux lacs urbains artificiels d'Orléans. Réunion des Sciences de la Terre, 29 octobre-2 novembre, Pau, France.

2013

14- Berdagué, P., Lesot, P., Jacob, J., Terwilliger, V.J., Le Milbeau, C., 2013. Hydrogen isotope profile of methyl groups in miliacin (olean-18-en-3βol ME) by natural abundance deuterium 2D-NMR spectroscopy in liquid crystals. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

15- Bossard, N., Jacob, J., Bariac, T., Terwilliger, V.J., Le Milbeau, C., Biron, P., Vergès, E., 2013. Decoupling the environmental controls on the δD of miliacin. Greenhouse experiments. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

16- Chassiot, L., Le Milbeau, C., Di6giovanni, C., Chapron, E., Lajeunesse, P., Jacob, J., 2013. A 700-year molecular record of past environments and land use history (Lake Montcineyre, Massif Central, France). IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

17- Ghirardi, J., Jacob, J., Le Milbeau, C., Bauer, H., Quesnel, F., Flehoc, C., Schnyder, J., DiGiovanni, C., 2013. Biomarker assemblages associated with the Eocene-Oligocene transition in lacustrine deposits of the Rennes Basin (France). IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

18- Jacob, J., Lavrieux, M., Terwilliger, V.J., Py-Circan, C., Cazaunau, M., Le Milbeau, C., Mellouki, W., 2013. Experimental studies on the hydrogen isotopic effects associated with

structural changes in pentacyclic triterpenes. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

19- Guillemot, T., Jacob, J., Zocatelli, R., Bichet, V., Massa, C., Gauthier, E., Le Milbeau, C., Richard, H., 2013. Biomarker insights into the evolution of land use in southern Greenland during the last two millennia. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

20- Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Dupuis, C., Le Milbeau, C., Boussafir, M., Baudin, F., Quesnel, F., 2013. Spatial consistency of biomarker records in sediments. A case study from the Paleocene-Eocene transition in the Cap d'Ailly area (France). IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

21- Garel, S., Quesnel, F., Jacob, J., Dupuis, C., Le Milbeau, C., Boussafir, M., Flehoc, C., Baudin, F., Schnyder, J., 2013. Paleocene-Eocene Thermal maximum impacts on terrestrial environments of the Paris Basin, France. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

22- Le Milbeau, C., Jacob, J., Zocatelli, R., Gogo, S., Laggoun-Défarge, F., 2013. Origin of dimethoxyserratene derivatives in a peat bog. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

23- Zocatelli, R., Disnar, J.R., Jacob, J., Le Milbeau, C., 2013. Sterols and bile acids as markers of past and present interactions between human societies and its environment. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

24- Zocatelli, R., Jacob, J., Gogo, S., Le Milbeau, C., Laggoun-Défarge, F., 2013. Chemical diversity of soil lipids reflects surrounding vegetation in a French peatbog. IMOG 2013, Tenerife, Espagne, 16-20 septembre 2013.

2012

25- Jacob, J., Bossard, N., Poulenard, J., Billaud, Y., Guillemot, T., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Pierre, D., Terwilliger, V.J., Arnaud, F., 2012. Héritage moléculaire des sols actuels: Vers une approche spatialisée des paléochamps de millet autour du Lac du Bourget. Colloque Q8, Clermont-Ferrand, 29 février-2 mars 2012.

26- Lavrieux, M., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Jacob, J., Le Milbeau, C., Miras, Y., Andrieu-Ponel, V., Chapron, E., 2012. Biomarqueurs moléculaires et autres traceurs paléoenvironnementaux : approche multi-disciplinaire pour la discrimination des impacts anthropiques et climatiques sur l'archivage sédimentaire du Lac d'Aydat (Puy-de-Dôme). Colloque Q8, Clermont-Ferrand, 29 février-2 mars 2012.

27- Py-Circan, C., Jacob, J., Cazaunau, M., Le Milbeau, C., Bossard, N., Mellouki, A., 2012. Impact de la photodégradation sur le δD de la miliacine et autres triterpènes pentacycliques. Colloque Annuel du Groupe Français de Cinétique et Photochimie, 10-11 juin 2013, Orléans. Prix du meilleur poster.

28- Jacob, J., Le Milbeau, C., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2012. Signature isotopique combinée (δ13C-δD) de triterpènes pentacycliques extraits de fumiers archéologiques. 29èmes journées françaises de Spectrométrie de Masse, 17-20 septembre 2012, Orléans.

29- Py-Circan, C., Jacob, J., Cazaunau, M., Le Milbeau, C., Bossard, N., Mellouki, A., 2012. Impact de la photodégradation sur le δD de la miliacine et autres triterpènes pentacycliques. 29èmes journées françaises de Spectrométrie de Masse, 17-20 septembre 2012, Orléans.

30- Jacob, J., Chapron, E., Billaud, Y., Ledoux, G., Lajeunesse, P., Disnar, J.R., St-Onge, G., Le Milbeau, C., Bossard, N., Arnaud, F., 2012. Can we estimate catchment-scale biomass production from sedimentary. biomarkers? An attempt with miliacin in Late Bronze Age levels from Lake le Bourget (French Alps). Journées Scientifiques Climat et Impacts, 19-20 novembre 2012, Orsay.

31- Jacob, J., Chapron, E., Billaud, Y., Ledoux, G., Lajeunesse, P., Disnar, J.R., St-Onge, G., Le Milbeau, C., Bossard, N., Arnaud, F., 2012. Can we estimate catchment-scale biomass production from sedimentary biomarkers? An attempt with miliacin in Late Bronze Age levels from Lake le Bourget (French Alps). Journées Scientifiques Climat et Impacts, 19-20 novembre 2012, Orsay.

32- Jacob, J., Bossard, N., Poulenard, J., Billaud, Y., Guillemot, T., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Pierre, D., Terwilliger, V., Arnaud, F., 2012. Héritage moléculaire des sols actuels: Vers une approche spatialisée des paléochamps de millet autour du Lac du Bourget. Journées Scientifiques Climat et Impacts, 19-20 novembre 2012, Orsay.

33- Jacob, J., Bossard, N., Poulenard, J., Billaud, Y., Guillemot, T., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Pierre, D., Terwilliger, V., Arnaud, F., 2012. Héritage moléculaire des sols actuels: Vers une approche spatialisée des paléochamps de millet autour du Lac du Bourget. Journées Scientifiques Climat et Impacts, 19-20 novembre 2012, Orsay.

2011

34- Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., Boscardin, R., Lallier-Vergès, E., 2011. Spatial variability of compound-specific δD at the field scale: A case study from miliacin in broomcorn millet (Panicum miliaceum). IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

35- Jacob, J., Le Milbeau, C., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2011. Combined $\delta^{13}C$ - δD analysis of pentacyclic triterpenes and their derivatives. IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

36- Jacob, J., Chapron, E., Billaud, Y., Ledoux, G., Lajeunesse, P., Disnar, J.R., St-Onge, G., Le Milbeau, C., Bossard, N., Arnaud, F., 2011. Can we estimate catchment-scale biomass production from sedimentary biomarkers? An attempt with miliacin in Late Bronze Age levels from Lake le Bourget (French Alps). IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

37- Garel, S., Schnyder, J., Jacob, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Yans, J., Iakovleva, A., Roche, E., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2011. Paleocene-Eocene Thermal Maximum impacts on terrestrial environments. Insights from the organic matter evolution in the Vasterival section (Dieppe-Hampshire Basin, France). IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

38- Le Milbeau, C., Lavrieux, M., Jacob, J., Zocatelli, R., Disnar, J.R., 2011. Methoxy-serratenes as discriminant biomarkers for soils developed under conifer forests. IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

39- Nguyen Tu, T.T., Mendez-Millan, M., Egasse, C., Derenne, S., Zeller, B., Derrien, D., Jacob, J., Hatté, C., 2011. Molecular and isotope characterization of soil lipids along a savannah (C4)/eucalyptus (C3) chronosequence (Pointe-Noire, Congo). 25th IMOG, Interlaken, September 2011.

40- Lavrieux, M., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., Jacob, J., Le Milbeau, C., Zocatelli, R., 2011. Biomarker distribution along a pedosequence recording a transition from pasture to conifer forest (Massif Central, France). IMOG 2011, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Switzerland.

41- Turcq, B., Costa, R.L., Zocatelli, R., Albuquerque, A.L.S., Boucher, H., Boussafir, M., Cordeiro, R.C., Caquineau, S., Jacob, J., Siffedine, A., Swingedouw, D., 2011. Paleoclimate of the last two millenia in Northeast Brasil revealed by lake Boqueirão sedimentation. XVIIIth INQUA Meeting, Bern, July 2011.

42- Jacob, J., Le Milbeau, C., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2011. Combined $\delta^{13}C$ - δD analysis of pentacyclic triterpenes and their derivatives. STUDIUM CONFERENCE: "Hydrogen Isotopes as Environmental Recorders", 15-16 septembre, Orléans, France.

43- Bossard, N., Béchard, M., Jacob, J., Terwilliger, V., Le Milbeau, C., Lallier-Vergès, E., 2011. Spatial variability of compound-specific δD at the field scale: A case study from miliacin in broomcorn millet (Panicum miliaceum). STUDIUM CONFERENCE: "Hydrogen Isotopes as Environmental Recorders", 15-16 septembre, Orléans, France.

44- Bossard, N., Jacob, J., Terwilliger, V., Bariac, T., Le Milbeau, C., Biron, P., Richard, P., Lallier-Vergès, E., 2011. Fractionation of hydrogen isotopes between source water, leaf water and miliacin in Panicum miliaceum grown under controlled conditions. STUDIUM CONFERENCE: "Hydrogen Isotopes as Environmental Recorders", 15-16 septembre, Orléans, France.

45- Garel, S., Jacob, J., Schnyder, J., Boussafir, M., Dupuis, C., Storme, J.Y., Yans, J., Iakovleva, A., Roche, E., Le Milbeau, C., Quesnel, F., 2011. Evolution of hydrological conditions during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Vasterival section (Paris Basin, France). STUDIUM CONFERENCE: "Hydrogen Isotopes as Environmental Recorders", 15-16 septembre, Orléans, France.
46- Disnar, J.R., Stefanova, M., Lavrieux, M., Jacob, J., Bréheret, J.G., Arnaud, F., Reyss, J.L., 2011. Les TTHCs des marqueurs organiques de l'impact des activités humaines ? Acquis et questions. ASF 2011, Dijon.
47- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., 2011. History of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps) as recorded by a twin sedimentary record of miliacin. XVIIIth INQUA Meeting, Bern, July 2011.
48- Turcq, B., Costa, R.L., Zocatelli, R., Albuquerque, A.L.S., Boucher, H., Boussafir, M., Cordeiro, R.C., Caquineau, S., Jacob, J., Siffedine, A., Swingedouw, D., 2011. Paleoclimate of the last two millenia in Northeast Brasil revealed by lake Boqueirão sedimentation. XVIIIth INQUA Meeting, Bern, July 2011.

2010

49- Jacob, J., Bossard, N., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., 2010. Evolution of hydrological conditions during the Final Bronze Age. Insights from the δD of specific molecular biomarkers preserved in archaeological layers in Lake le Bourget. 6ème Congrès de la Société Française des Isotopes Stables, 26-29 octobre 2010, Toulouse, France.
50- Le Milbeau, C., Jacob, J., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2010. Carbon and hydrogen isotopic insights into the diagenesis of pentacyclic triterpenes. A case study from archaeological layers preserved in Lake le Bourget (France). 6ème Congrès de la Société Française des Isotopes Stables, 26-29 octobre 2010, Toulouse, France.
51- Lavrieux, M., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Chapron, E., Jacob, J., Arnaud, F., 2010. 6,000 years sedimentary record of flood events in Lake Aydat, French Massif Central: climatic and anthropic signals. 18th International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentine, 26 septembre – 1er octobre 2010.
52- Bossard, N., Jacob, J., Le Milbeau, C., Lallier-Vergès, E., Boscardin, R., 2010. Variabilité du dD moléculaire à l'échelle d'une parcelle : cas de la miliacine dans le millet commun (Panicum miliaceum). Forum RESONAT-DREAM, Orléans, 14 décembre 2010.
53- Le Milbeau, C., Jacob, J., Bossard, N., Disnar, J.R., Billaud, Y., 2010. Apport de la signature isotopique double ($\delta^{13}C$- δD) à la compréhension de la diagenèse des triterpènes pentacycliques. Cas des fumiers archéologiques préservés dans le lac du Bourget. Forum RESONAT-DREAM, Orléans, 14 décembre 2010.
54- Lavrieux, M., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., Granja, J., Chapron, E., Arnaud, E., 2010. 6500 ans d'érosion des sols autour du lac d'Aydat (Massif-Central): discrimination des facteurs anthropiques et climatiques. Forum RESONAT-DREAM, Orléans, 14 décembre 2010.

2009

55- Lavrieux, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., Chapron, E., Bréheret, J.G., 2009. Cortèges lipidiques associés aux niveaux archéologiques de l'âge du Bronze Final et préservés en contexte sub-aquatique littoral (Lac du Bourget, Savoie). Séminaire "Matières Organiques et Environnement", Sainte Maxime, 25-29 Janvier 2009.
56- Zocatelli, R., Turcq, B., Jacob, J., Boussafir, M., Disnar, J.R., Sifeddine, A., 2009. Changements récents de l'environnement et des activités humaines autour du Lac du Boqueirão (Nord Est Brésil). Séminaire "Matières Organiques et Environnement", Sainte Maxime, 25-29 Janvier 2009.
57- Jacob, J., Disnar, J.R., Billaud, Y., Arnaud, F., Le Milbeau, C., 2009. Molecular signature of Late Bronze Age archaeological layers preserved in littoral settings in Lake le Bourget (French Alps). IMOG 2009, Brême, 9-12 septembre 2009.

58- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Billaud, Y., Chapron, E., Sicre, M.A. Boscardin, R., 2009. High resolution record of millet cultivation during the Bronze Age around Lake le Bourget (French Alps). Is there any climatic control? IMOG 2009, Brême, 9-12 septembre 2009.
59- Lavrieux, M., Jacob, J., Disnar, J.R., Bréheret, J.G., 2009. Biomarker signatures of former soil uses. A case study from the catchment area of Lake Aydat (Massif Central, France). IMOG 2009, Brême, 9-12 septembre 2009.

2007

60- Jacob, J., Gautret, P., Defarge, C., Albéric, P., Baillif, P., Lottier, N., 2007. Organic insights into the bioprecipitation of carbonates in photosynthetic biofilms. A case study from La Laguna de Chiprana hypersaline lake (Spain). ILIC 2007, Barcelone, 11-14 juillet 2007.
61- Jacob, J., Gautret, P., Défarge, C., Albéric, P., Baillif, P., Lottier, N., 2007. Organic insights into the bioprecipitation of carbonates in photosynthetic biofilms. A case study from LA Laguna de Chiprana hypersaline lake (Spain). IMOG 2007, Torquay, 9-14 septembre 2007.
62- Arnaud, F., and the Aphrodyte Project Group. Tracking Holocene climate and land-use changes in the Alps: results from Aphrodyte interdisciplinary project. EGU, Vienne (Autriche) avril 2007.
63- Jacob, J., Disnar, J.R., Arnaud, F., Chapron, E., Debret, M., Lallier-Verges, E., Desmet, M., Revel-Rolland, M., 2007. Culture du millet et érosion des sols depuis l'Age du Bronze autour du Lac du Bourget : Apport des lipides sédimentaires au projet APHRODYTE. Colloque de restitution ECLIPSE, Paris, 15-16 octobre 2007.
64- Bréheret, J.G., Argant, J., Disnar, J.R., Jacob, J., Fourmont, A., Macaire, J.J., Trément, F., 2007. Impact anthropique sur l'érosion des sols et la sédimentation dans les zones humides associées durant l'Holocène. Evolution du paléolac de Sarlième (Puy-de-Dôme) et de son environnement durant l'Atlantique : impacts climatique et anthropique. Colloque de restitution ECLIPSE, Paris, 15-16 octobre 2007.
65- Arnaud, F., and the Aphrodyte Project Group, 2007. Tracking Holocene climate and land-use changes in the Alps: results from Aphrodyte interdisciplinary project. Colloque de restitution ECLIPSE, Paris, 15-16 octobre 2007.
66- Chapron, E., Arnaud, F., Desmet, M., Debret, M., Perdereau, L., Marguet, A., Billaud, Y., Jacob, J., Disnar, J.R., Lallier-Verges, E., Revel-Roland, M., Richard, H., Magny, M., 2007. Aphrodyte 2 (variabilité climatique holocène et peuplements humains dans le bassin versant du haut Rhône français) : Une approche pluridisciplinaire des archives du Lac du Bourget. Colloque de restitution ECLIPSE, Paris, 15-16 octobre 2007.
67- Ghienne, J.F. et al., 2007. Glaciations et crises biologiques : exemple de l'épisode fini-Ordovicien (archives sédimentaires, paléoenvironnements et biodiversité, cycle du carbone). Colloque de restitution ECLIPSE, Paris, 15-16 octobre 2007.

2006

68- Jacob, J., Huang, Y., Disnar, J.-R., Sifeddine, A. et Albuquerque, A.L.S., 2006. Estimation des variations d'humidité dans le nord-est du Brésil depuis 20 000 ans au moyen du D/H de biomarqueurs moléculaires. Séminaire « Matières Organique, Etat de l'Art et Perspectives », Carqueiranne, 22-24 janvier 2006.

2005

69- Jacob, J., Huang, Y., Albuquerque, A.L.S., Sifeddine, A., et Disnar, J.R., 2005. Paleohydrology of tropical South America since the Last Glacial Maximum. Insights from the δD of algal and terrestrial molecular markers in lake sediments. 22nd IMOG meeting, Séville (Espagne), septembre 2005.
70- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Kéravis, D., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2005. Rapid paleoenvironmental variations in NE Brazil during the Lateglacial. Insights from TpS2, S3CO2 and S3CO Rock Eval parameters. 22nd IMOG meeting, Séville, Espagne, septembre 2005.
71- Gurgel, M.H., Sifeddine, A. Lallier-Vergès, E., Boussafir, M. et Jacob, J., 2005. Holocene Paleoceanographic Conditions of Cabo Frio Upwelling System (Rio de Janeiro / Brazil). As

Inferred by Bulk and Molecular Geochemical Approach From Sedimentary Organic Matter. AGU Fall Meeting, San Francisco, Décembre 2005.

2004

72- Jacob, J., Sicre, M.A., Yiou, P., Eiriksson, J., Knudsen, K.L., Jansen, E. and Labeyrie, L., 2004. Solar forcing on SST variability in the North Atlantic during the last 2000yrs. ICP8, Biarritz, 5-9 septembre 2004.

73- Jacob, J., Duval, J. et Monod, O., 2004. Essai de caractérisation moléculaire de la matière organique dans la formation de Bedinan (Caradoc-Ashgill) en Turquie (Border Folds et Taurus). Réunion des Sciences de la Terre, Strasbourg, septembre 2004.

2003

74- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2003. Paleoenvironmental record of the last 20,000 years in north-eastern Brazil (Lake Caçó, Maranhaõ State): Insights from Rock Eval pyrolysis. 3rd International Limnogeology Congress, Tucson (USA), 29 mars – 2 avril 2003.

75- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Ledru, M.-P., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2003. New higher plant biomarkers for deciphering past vegetational successions in continental Quaternary tropical sedimentary series. 3rd International Limnogeology Congress, Tucson (USA), 29 mars - 2 avril 2003.

76- Jacob, J., Disnar, J.R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2003. Pentacyclic triterpene methyl ethers (PTME) in sediments of Lake Caçó (NE Brazil): plant sources and diagenetic behaviour. 21st IMOG meeting, Krakow (Poland), 8-12 septembre 2003.

2002

77- Jacob, J., Disnar, J-R., Boussafir, M. et Sifeddine, A., 2002. Pentacyclic Triterpene Methyl Ethers (PTME): a new class of biomarkers to trace Gramineae in tropical settings? BOGS 2002, Newcastle (UK), juin 2002. Best Poster Award.

2001

78- Jacob, J., Disnar, J-R., Boussafir, M., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S. et Turcq, B., 2001. Organic geochemistry record of paleoenvironmental and diagenetic conditions in sediments from an intertropical lake (Lagoa de Caçó, Brazil). IMOG 2001, Nancy.

VI. Séminaires invités

1- Jacob, J., 2018. Lecture des archives géologiques par les fossiles moléculaires : de l'âge du Bronze à l'Anthropocène. Jeudis de DGR, BRGM, avril 2018.

2- Jacob, J., 2018. De la rétro-observation des écosystèmes passés à l'observation des mondes urbains actuels. Séminaire au LEESU, 4 avril 2018.

3- Jacob, J., 2016. La représentativité spatio-temporelle des biomarqueurs moléculaires dans les archives sédimentaires. Séminaire du Réseau Thématique MIDI, 29 mars 2016, Maison des Sciences de l'Homme, Tours.

4- Jacob, J., 2015. Biomarqueurs moléculaires pour les reconstructions paléoenvironnementales : Les cavernes d'Ali Baba et de Platon. Séminaire du GET, Toulouse, 3 mars 2015.

5- Jacob, J., 2015. Molecular biomarkers in sediments: from Ali Baba to Plato's cave. ITN iTECC, Aix-en-Provence, 19 janvier 2015.

6- Jacob, J., 2015. Fossiles moléculaires et environnements anciens : de la caverne d'Ali Baba à celle de Platon. 13ème Colloque de l'association des doctorants du CBM, 20 février 2015.

7- Jacob, J., 2013. Les interactions Hommes-Milieux-Climats par la lorgnette des molécules organiques fossiles préservées dans les archives sédimentaires. Séminaire ArScan, Nanterre, 7 février 2013.

8- Jacob, J., 2012. De l'application du δD moléculaire en paléohydrologie. "Climats du Passé, nouvelles questions, les réponses des isotopes" Après-Midi Scientifique de la Société Française des Isotopes Stables, 11 mai 2012, Paris.

9- Jacob, J., Bossard, N., Le Milbeau, C., Disnar, J.R., Billaud, Y., Chapron, E., Gérard, J., Soltysiak, L., Perga, M.E., Arnaud, F., 2011. La culture du millet autour du Lac du Bourget durant l'âge du Bronze. Workshop International "Economie alimentaire et alimentation à l'Age du Bronze en Europe : aspects pluridisciplinaires", 8- 9 novembre 2011, Aix en Provence, France.

10- Jacob, J., Le Milbeau, C., Bossard, N., Terwilliger, N., Lallier-Vergès, E., Bariac, T., Disnar, J.R., Boscardin, R., 2011. Acquis, questions et perspectives liés à l'utilisation du δD moléculaire dans les reconstructions paléohydrologiques, en domaine continental. Séminaire "Isotopes Stables" ThermoScientific, Annecy, 24-25 mars 2011.

11- Communication chimique à travers le temps. Applications des fossiles moléculaires à la compréhension des interactions Homme-Climat-Environnement. Séminaires de l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte, Tours, juin 2010.

12- Quelques recettes de cuisine moléculaire appliquées aux interactions Homme-Climat-Environnement. UMR PEPS, Lyon, 1er février 2010.

13- Traceurs et proxies moléculaires dans les sédiments lacustres. Journées d'études Rhône-Alpes "Les matières organiques naturelles dans l'environnement : indicateurs de l'état des écosystèmes ?", Pont-en-Royans, 26-27 mai 2009.

14- Climat, agriculture, érosion et qualité des sols autour du Lac du Bourget pendant le Néolithique et l'Age du Bronze. Conférence "Paléo", LMTG, Toulouse, janvier 2008.

15- Climat, agriculture, érosion et qualité des sols autour du Lac du Bourget pendant le Néolithique et l'Age du Bronze. Séminaire Bioemco, Grignon, Février 2008.

16- Apports de l'étude des fossiles moléculaires et de leur composition isotopique à la reconstruction des environnements et climats passés, 8 avril 2005, CRPG, Nancy.

17- Traceurs moléculaires et isotopiques des changements de l'environnement, des variations du climat et des activités humaines, pendant le Quaternaire récent. Laboratoire de Chrono-Ecologie, Besançon, 21 mars 2007 et Laboratoire de Géographie Physique, Meudon, 22 mars 2007.

18- Traceurs moléculaires et isotopiques des changements de l'environnement, des variations du climat et des activités humaines pendant le Quaternaire récent. Laboratoire ECOLAG, Montpellier, 11 mai 2007.

19- Traceurs moléculaires et isotopiques des changements de l'environnement, des variations du climat et des activités humaines pendant le Quaternaire récent. TOTAL, Centre Scientifique et Technique Jean Fréger, Pau, 13 avril 2007.

20- Past Climate-Human-Environment interactions reconstructed from fossil molecules in sediments. Université de Cambridge, Royaume Uni, 27 novembre 2007.

21- Culture du millet et érosion des sols depuis l'âge du Bronze autour du Lac du Bourget : apport des lipides sédimentaires. Séminaire EDYTEM, Le Bourget du Lac, 7 décembre 2007.

22- Enregistrement des variations passées du climat et estimation de leurs impacts sur les écosystèmes au moyen de molécules fossiles préservées dans les archives sédimentaires, 28 février 2006, LPCE, Orléans.

23- Applications récentes de l'isotopie moléculaire à la quantification des variations climatiques et à l'estimation de leurs impacts sur les environnements anciens. Septembre 2005, ISTO, Orléans.