

CHAP. 1 : LES ORIGINES.

1.1. AVANT LA VIE : UNE HISTOIRE PRÉBIOTIQUE ?

Il n'y avait pas de rivières, pas de montagnes, même pas de mer - encore moins d'hommes... Il n'y avait tout simplement pas... de Terre.

Au début de l'histoire, il nous faut faire l'effort d'imaginer l'immensité d'une galaxie comptant au bas mot une centaine de milliards d'étoiles séparées par des vides abyssaux - et, sans doute, au moins dix fois plus de planètes.

Point minuscule perdu dans une nuit sans fin, cette galaxie tournait sur elle-même - très lentement à l'échelle de l'Univers dans lequel elle s'inscrivait, mais à une vitesse hallucinante, littéralement astronomique, pour les formes de vie qui peuplèrent un jour une petite planète cachée dans la poussière stellaire de l'un de ses bras.

Un cinquième au moins de la matière de la Galaxie n'était ni étoile, ni planète : seulement de gigantesques nuages de poussière et de gaz contenant quelques dizaines d'atomes au centimètre cube... Alors, ici ou là, de temps en temps, cette matière tendait à s'agglutiner, à s'agglomérer sous des pressions phénoménales pour former une nouvelle étoile, accompagnée de quelques planètes : un nouveau système stellaire - que l'on pourrait aussi qualifier, par référence à notre étoile, de système solaire.

On estime en effet que notre Soleil est né de la sorte il y a environ 4,7 milliards d'années. Et notre planète aurait pour sa part achevé de se former il y a 4,6 milliards d'années.

4.600.000.000 de révolutions autour du Soleil... Démesure de l'espace. Démesure du temps.

Pour tenter d'appréhender une telle durée, l'homme a divisé l'histoire de sa planète - l'histoire *géo*-logique - en cinq grandes périodes :

- l'Antécambrien ou Précambrien qui court des origines jusque vers -540 millions d'années,
- l'ère primaire de -540 à -250 millions d'années,
- l'ère secondaire de -250 à -66 millions d'années,
- l'ère tertiaire de -66 à -2,6 million d'années,
- et l'ère quaternaire, enfin, qui a débuté il y a donc 2,6 millions d'années et qui se poursuit en ce moment même.

Ces grandes ères géologiques sont bien entendu sans rapport avec notre ère, également appelée aujourd'hui ère commune, qui sert de cadre à notre calendrier, et que l'on a fait débiter avec

l'année présumée de la naissance du Christ¹. Elles sont elles-mêmes séparées en périodes (Lias, Trias, Crétacé, Oligocène, Miocène...) elles-mêmes encore scindées en étages géologiques (Néocomien ou Aptien par exemple, dans le Crétacé).

Dès les débuts de l'Antécambrien, les couches superficielles de la Terre (jusqu'à une profondeur d'une centaine de kilomètres) ont été échauffées par la présence d'éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium ou le potassium 40 (⁴⁰K).

Ce phénomène a engendré un volcanisme intense qui a libéré tous les gaz précédemment emprisonnés dans ces couches superficielles. C'est ainsi que la Terre s'est trouvée dotée d'une atmosphère - quoiqu'elle fût initialement absolument irrespirable. Riche en dioxyde de carbone (CO₂), en dioxyde de soufre (SO₂), et en vapeur d'eau (H₂O) l'oxygène libre (O₂) y était de fait très rare, sinon inexistant. Pour qu'il commençât à compter et à jouer un rôle, il fallait que la vie (anaérobie à ses débuts) apparût. Seule celle-ci - et plus précisément la vie végétale - allait en effet pouvoir libérer une partie de l'O₂ dans l'atmosphère en assemblant entre eux les atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) au fur et à mesure que des milliards de milliards de cellules se construiraient...

1.2. LES DÉBUTS DE LA VIE : DE LA MER À LA TERRE.

Or, c'est assez ennuyeux, mais on ne sait toujours pas précisément comment la vie est née - et peut-être ne le saura-t-on jamais. Il existe en effet diverses théories tout aussi vraisemblables. Pour certains il aurait pu exister dans le nuage cosmique originel du système solaire les molécules organiques nécessaires à la construction des premières cellules vivantes². On a retrouvé leur trace dans la météorite de Murchison en Australie découverte en 1969. Pour d'autres au contraire, la vie aurait pu naître spontanément. L'une des théories les plus intéressantes dans cette direction, et peut-être la plus en amont, celle qui prend les choses le plus à leur début, reste celle de l'Allemand G. Wächtershäuser, publiée entre 1990 et 2000. Pour lui, les prémices de la vie auraient pu se développer à partir de l'évolution naturelle de molécules minérales (notamment du sulfure de fer, ou du sulfure de nickel) soumises à certaines conditions spécifiques de pression et de température³.

¹ Celle-ci a été calculée en 532 par rapport à la fondation de Rome qui servait alors de référence - mais il semble bien que le moine qui s'est livré à ces calculs a commis une erreur de 3 à 6 ans... Quoi qu'il en soit, ce n'est que dans le courant du VIII^e siècle que l'on a adopté cette base de calcul du temps, et en 1622 que l'on a définitivement fixé le début de l'année au premier janvier.

Sur ce sujet, voir par exemple A. Larané, 532 à 726, Invention de l'ère chrétienne... et oubli de l'An zéro, ds Hérodote.net, 26.02.2020.

En ligne : https://www.herodote.net/Invention_de_l_ere_chretienne_et_oubli_de_l_An_zero-synthese-27.php

² Par exemple J. Labeyrie, L'Homme et le climat Paris, Denoël, 1993, p. 30.

³ G. Wächtershäuser, Evolution of the first metabolic cycles, ds PNAS (Proceedings of the National Academy of Science), 87, 1, janvier 1990, pp. 200-204.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/87/1/200/tab-article-info>

G. Wächtershäuser, Origin of Life, Life as We Don't Know It, ds Science 289, 5483, août 2000, pp. 1307-1308. <https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EPS281r/Sources/Origin-of-life/geothermal-vents/more/Wachtershauser-2000.pdf>

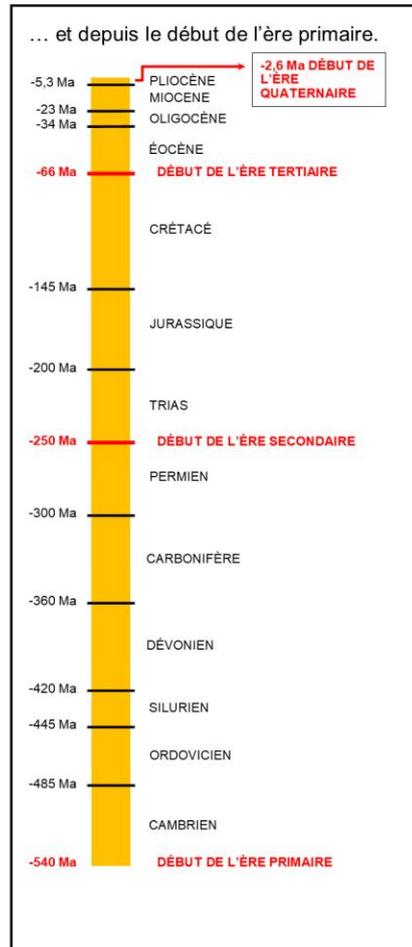
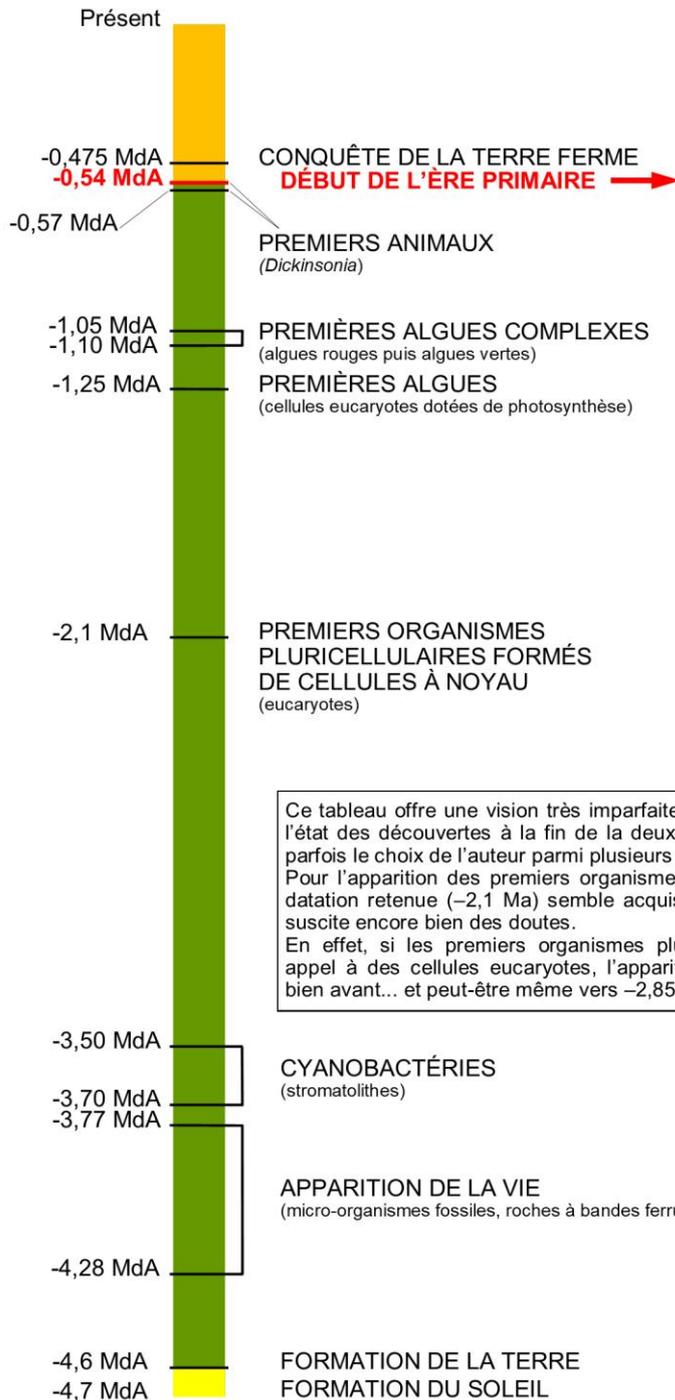
Voir aussi M. Nowak, Entretien, Günter Wächtershäuser, la première étincelle de la vie, ds La Recherche n° 336, novembre 2000, pp. 109-111.

En ce sens encore, plus récemment : B. Ménez, C. Pisapia, M. Andreani, F. Jamme, Q. P. Vanbellingen, A. Brunelle, L. Richard, P. Dumas, M. Réfrégiers, Abiotic synthesis of amino acids in the recesses of the oceanic lithosphere, ds Nature, 564, 2018, pp. 59-63.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0684-z>

PI. 01 : GRANDS REPÈRES.

Depuis les origines...



Ce tableau offre une vision très imparfaite de la réalité. Il reflète seulement l'état des découvertes à la fin de la deuxième décennie du XXI^e siècle, et parfois le choix de l'auteur parmi plusieurs hypothèses. Pour l'apparition des premiers organismes pluricellulaires, par exemple, la datation retenue (-2,1 Ma) semble acquise. Mais leur nature d'eucaryotes suscite encore bien des doutes. En effet, si les premiers organismes pluricellulaires découverts faisaient appel à des cellules eucaryotes, l'apparition de celles-ci devrait se situer bien avant... et peut-être même vers -2,85 Ma comme on l'a cru longtemps.



Peut-être des phénomènes cosmiques ont-ils eu leur part là aussi - mais pas en tant que vecteurs de molécules organiques primordiales cette fois. En 2015, les Américains D. Lowe et G. Byerly ont mis en avant un énorme bombardement tardif d'astéroïdes géants. Il s'agirait de corps célestes de 50 à 100 km de diamètre - contre 10 à 14 km pour le bolide d'Alvarez que l'on associe à la fin des dinosaures. Les traces étudiées par les chercheurs américains en Afrique du Sud se placent entre -3,29 et -3,23 milliards d'années¹. Ce serait un peu tardif pour l'apparition de la vie que l'on situe dans les océans vers -3,77 milliards d'années, voire -4,28 milliards d'années². Mais l'événement qu'ils ont pointé là fait suite au Grand Bombardement Tardif, un épisode de même nature survenu entre -4.1 et -3.8 milliards d'années³. Ces bombardements, qui auraient déposé partout à la surface de la Terre une fine couche d'iridium, auraient mis en œuvre des forces colossales. Ils auraient provoqué des tremblements de terre d'une puissance indescriptible⁴, modifié la tectonique des plaques, et porté les mers et l'atmosphère à ébullition pour une longue période. On estime en effet qu'au moment de l'impact leur température a pu s'élever jusqu'à 500° C⁵, et qu'une couche de plusieurs dizaines de mètres, voire peut-être cent mètres, d'eau de mer s'est évaporée⁶. Il y aurait largement de quoi obtenir les températures nécessaires à l'éclosion de la vie à partir de substances minérales, en particulier de sulfures de fer...

En fait, les diverses théories en présence ne sont pas nécessairement exclusives les unes des autres, car la vie pourrait très bien avoir eu plusieurs sources - et même avoir fait plusieurs apparitions successives, avoir connu plusieurs départs. A ce titre le Grand Bombardement Tardif pourrait constituer à la fois le cadre d'une extinction et d'une réapparition de la vie.

Pour l'heure il reste donc impossible de privilégier l'une ou l'autre des théories mettant en scène l'apparition de la vie. Mais on peut découvrir ici ou là des témoignages de celle-ci. C'est le cas de micro-organismes fossilisés retrouvés dans des roches sédimentaires ferrugineuses de la ceinture de roches vertes de Nuvvuagittuq, au Canada (à l'est de la Baie d'Hudson). Le contexte a suggéré qu'il s'agissait des restes de cheminées hydrothermales situées sur le fond marin⁷. Malgré la datation qui pourrait coïncider (-3,77 MdA et peut-être -4,28 MdA) le Grand Bombardement Tardif ne serait donc pas en cause ici. C'est encore le cas de témoins indirects

¹ D. R. Lowe, G. R. Byerly, Geologic record of partial ocean evaporation triggered by giant asteroid impacts, 3.29–3.23 billion years ago, ds *Geology*, 43, 6, mai 2015, pp. 535–538.

En ligne : <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/43/6/535/131914/Geologic-record-of-partial-ocean-evaporation?redirectedFrom=fulltext>

² M. S. Dodd, D. Papineau, T. Grenne, J. F. Slack, M. Rittner, F. Pirajno, J. O'Neil, C. T. S. Little, Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates, ds *Nature*, 543, mars 2017, pp. 60-64.

En ligne <https://www.nature.com/articles/nature21377>

³ D. R. Lowe, G. R. Byerly, The terrestrial record of Late Heavy Bombardment, ds *New Astronomy Reviews*, 81, avril 2018, pp. 39-61.

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387647317300714?via%3Dihub>

⁴ On a avancé cent fois la puissance du séisme de 2011 qui a atteint Fukushima : voir A. Rathi, Massive asteroid may have kickstarted the movement of continents, ds *The conversation*, 11 avril 2014.

En ligne : <http://theconversation.com/massive-asteroid-may-have-kickstarted-the-movement-of-continents-25528>

⁵ N. Sleep, D. Lowe, Physics of crustal fracturing and chert dike formation triggered by asteroid impact, ~3.26 Ga, Barberton greenstone belt, South Africa, ds *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 4, avril 2014, pp. 1054-1070.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GC005229>

⁶ D. R. Lowe, G. R. Byerly, Geologic record of partial ocean evaporation triggered by giant asteroid impacts, 3.29–3.23 billion years ago, ds *Geology*, 43, 6, mai 2015, p. 535.

⁷ M. S. Dodd, D. Papineau, T. Grenne, J. F. Slack, M. Rittner, F. Pirajno, J. O'Neil, C. T. S. Little, Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates, ds *Nature*, 543, mars 2017, pp. 60-64.

En ligne <https://www.nature.com/articles/nature21377>

de la vie retrouvés sur deux sites différents à l'ouest du Groenland¹ : des roches à bandes ferrugineuses datées de -3,85 Mda (au moins) et -3,80 Mda analysées en 1996 renfermaient certains isotopes du carbone dans des proportions qui traduisent la présence d'enzymes associés à des êtres vivants. Un peu plus vieux que les vestiges de la baie d'Hudson, on ignorait en 1996 de quelle forme de vie il pouvait s'agir et dans quel contexte elle avait pu se développer. Il était toutefois probable qu'il s'agissait de minuscules bactéries anaérobies, sans besoin en oxygène - ce qui tombait bien. Certaines de ces premières bactéries (les cyanobactéries, ou algues bleues) contenaient de la chlorophylle. Comme toutes les plantes après elles - et à la différence du chewing-gum - grâce à cette chlorophylle elles étaient capables par photosynthèse de "casser" le gaz carbonique pour fabriquer les sucres nécessaires à leur croissance, tout en rejetant de l'oxygène. Groupées en structures compactes appelées stromatolithes, ce sont elles qui ont contribué à doter la Terre d'une atmosphère respirable - quoique bien plus tard, vers -2,4 Mda, comme on le verra. Or les plus anciens stromatolithes ont été reconnus au Groenland, précisément sur l'un des sites ayant révélé les premières traces de vie, où ils ont été datés de -3,70 Mda². Jusqu'à leur découverte, c'était en Australie où ils étaient datés autour de -3,50 Mda que l'on connaissait les plus anciens stromatolithes³. Aujourd'hui on trouve encore des stromatolithes dans des mers chaudes et peu profondes ou dans des lacs aux eaux assez chaudes en Australie, en Egypte, ou au Brésil. On aurait également reconnu des structures stromatolithiques dans les sources d'eau chaude et sulfureuse du parc de Yellowstone aux Etats-Unis. A une époque où l'on parle beaucoup de l'augmentation du gaz carbonique et de l'effet de serre, il serait peut-être bon de se souvenir que ce sont les cyanobactéries qui ont pourvu la Terre d'une atmosphère respirable⁴. Il faut certes garder à l'esprit que les conditions primitives étaient bien différentes de celles qui prévalent de nos jours⁵. Mais la présence de cyanobactéries actives (et créatrices de stromatolithes) en particulier sur certains littoraux chauds et peu profonds de l'Australie occidentale, montrent que même aujourd'hui, les cyanobactéries ne demandent qu'à travailler...

¹ S. J. Mojzsis, G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman, C. R. L. Friend, Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago, ds Nature, 384, novembre 1996, pp. 55-59.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/384055a0>

² A. P. Nutman, V. C. Bennett, C. R. L. Friend, M. J. van Kranendonk, A. R. Chivas, Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures, ds Nature, 537, août 2016, pp. 535-538.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/nature19355>

³ M. J. Van Kranendonk, P. Philippot, K. Lepot, S. Bodorkos, F. Pirajno, Geological setting of Earth's oldest fossils in the c. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara craton, Western Australia, ds Precambrian Research, 167, 2008, pp. 93-124.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/245540599_Geological_setting_of_Earth's_oldest_fossils_in_the_ca_3_5_Ga_Dresser_Formation_Pilbara_Craton_Western_Australia

⁴ Certains travaux impliquant les cyanobactéries entrouvrent déjà la porte à leur utilisation industrielle. C'est le cas des recherches menées récemment pour produire un béton d'origine biologique : voir C. M. Heveran, S. L. Williams, Jishen Qiu, J. Artier, M. H. Hubler, S. M. Cook, J. C. Cameron, W. V. Srubar III, Biomineralization and Successive Regeneration of Engineered Living Building Materials, ds Matter, Cell Press, 15 janvier 2020. En ligne : [https://www.cell.com/matter/fulltext/S2590-2385\(19\)30391-1](https://www.cell.com/matter/fulltext/S2590-2385(19)30391-1)

Compte-rendu en français : F. Daninos, un béton vivant capable de s'auto-repliquer ! ds Sciences et Avenir en ligne, 17.01.2020 (20.01.2020).

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/un-beton-vivant-capable-de-s-auto-repliquer_140586
En dehors de l'oxygène, et même avant lui dans une optique industrielle, les cyanobactéries pourraient donc produire des carbonates utilisables.

⁵ M.-L. Pons, La Terre à l'Archéen, Apport des isotopes de métaux de transition (Zn, Fe), Thèse Sciences de la Terre. Ecole normale supérieure (ENS), Lyon, 2011, ici pp. 145-146.

En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00682665/document>

Grâce au développement des cyanobactéries en tout cas, l'oxygène est devenu suffisamment abondant pour jouer un rôle et laisser des traces. Ce sont principalement ces fameuses roches à bandes ferrugineuses, dans lesquelles on a trouvé les premiers témoins de la vie au Groenland. Jadis appelées roches bandées, on les qualifie maintenant de formations de fer rubané (ou BIF, pour l'anglais Banded Iron Formations)¹. Elles se signalent le plus souvent par une alternance de bandes grises et brun-orangé. Elles correspondent à des phases de dépôt d'oxyde de fer qui attestent la présence d'oxygène libre dans l'eau de mer. Connues dès -3,85 MdA (et peut-être même un peu avant)² au Groenland, ces formations de fer rubané (BIF) ont continué de se former jusque vers -1,8 milliard d'années³.

Ce qui est extraordinaire, c'est qu'on les trouve partout à la surface de la Terre (pourvu bien sûr qu'il y ait des roches de cette époque). Il semblerait ainsi que pendant plus de 2 milliards d'années l'oxygène ait été alternativement présent et absent, et corollairement que la vie sous sa forme bactérienne ait connu des sortes de pulsations qui pourraient traduire des accidents d'ordre climatique, volcanique ou cosmique. Mais elle a continué son cours, même si celui-ci était loin d'être continu.

Vers -2,4 MdA ou 2,3 MdA en tout cas, on distingue un épisode baptisé Grande Oxydation ou grande Oxygénation (*Great Oxidation Event* en anglais)⁴. En fait l'une (la Grande Oxydation) est la conséquence de l'autre (la Grande Oxygénation). Le terme est cependant un peu trompeur, car il peut laisser penser que c'est là qu'il faut situer la production massive d'oxygène. Or il n'en est rien. Depuis plus d'un milliard d'années les cyanobactéries étaient au travail, quoique de manière très discontinue comme on vient de le voir. Mais l'oxygène rejeté par ces cyanobactéries était sans doute principalement absorbé par la mer. Seule une part minime atteignait l'atmosphère. Dans la mer, l'oxygène se combinait en effet avec les oligo-éléments marins, en particulier le fer "ferreux" qui précipitait en hématite (Fe₂O₃) ou en magnétite (Fe₃O₄). Or, vers -2,4 MdA, le fer ferreux marin aurait été pratiquement épuisé. L'oxygène serait donc passé quasi-totalement dans l'atmosphère⁵. Quand on parle Grande Oxygénation c'est donc de l'oxygénation de celle-ci qu'il s'agit, en parallèle d'une désoxygénation des océans. Pour autant, même si nos cyanobactéries anaérobies ont pu se sentir un peu mal dans un monde qu'elles avaient joyeusement (enfin, on l'espère) saturé d'oxygène, elles n'ont pas cessé de croître, de disparaître, de réapparaître, de croître à nouveau - et alors de travailler.

¹ M.-L. Pons, La Terre à l'Archéen, Apport des isotopes de métaux de transition (Zn, Fe), Thèse Sciences de la Terre. Ecole normale supérieure (ENS), Lyon, 2011, ici p. 8.

En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00682665/document>

² S. J. Mojzsis, G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman, C. R. L. Friend, Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago, notamment p. 55 (résumé) : « *a similar formation from the nearby Akilia island that is possibly older than 3,850 Myr* ».

³ M.-L. Pons, La Terre à l'Archéen, Apport des isotopes de métaux de transition (Zn, Fe), Thèse Sciences de la Terre. Ecole normale supérieure (ENS), Lyon, 2011, ici pp. 144, 145-146.

En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00682665/document>

⁴ Pour la datation à -2,4 MdA voir par exemple K. L. French, C. Hallmann, J. M. Hope, P. L. Schoon, J. A. Zumberge, Y. Hoshino, C. A. Peters, S. C. George, G. D. Love, J. J. Brocks, R. Buick, R. E. Summons, Reappraisal of hydrocarbon biomarkers in Archean rocks, ds PNAS, 112, 19, mai 2015, pp. 5915-5920.

En ligne : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4434754/>

pour la datation à -2,3 MdA voir D. E. Canfield, L. Ngombi-Pemba, E. U. Hammarlund, S. Bengtson, M. Chaussidon, F. Gauthier-Lafaye, A. Meunier, A. Riboulleau, C. Rollion-Bard, O. Rouxel, D. Asael, A.-C. Pierson-Wickmann, A. El Albani, Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere, ds PNAS, 110, 42, octobre 2013, pp. 16736-16741.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/110/42/16736>

⁵ Une autre hypothèse a fait la part belle au nickel, mais cela ne change rien au résultat.

Pour les passionnés, sur cette hypothèse voir K. O. Konhauser, E. Pecoits, S. V. Lalonde, D. Papineau, E. G. Nisbet, M. E. Barley, N. T. Arndt, K. Zahnle, B. S. Kamber, Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event, ds Nature, 458, avril 2009, pp. 750-753.

<https://www.nature.com/articles/nature07858>

Pourtant, entre -2,4 et -2,1 MdA tout le processus a bien failli être remis en question par une gigantesque glaciation, dite huronienne parce qu'elle a été identifiée sur les rives du lac Huron, au Canada. Il s'agit d'un évènement paroxystique : la terre s'est pratiquement trouvée réduite à une boule de glace, seules les eaux équatoriales demeurant libres. En plus d'une variation très importante de l'activité solaire, l'explication la plus convaincante du phénomène demeure peut-être une intensification considérable (et globale) de l'activité volcanique : elle aurait projeté dans l'atmosphère suffisamment de cendres pour contrecarrer l'effet de serre provoqué par le méthane (CH₄) ou le dioxyde de carbone (CO₂) résultant de l'altération du méthane alors très abondant par l'oxygène libéré au moment de la Grande Oxydation... La faiblesse de l'activité solaire se lit dans l'augmentation sensible des isotopes du carbone à cette époque (dont on a retrouvé la trace au Gabon)¹. En effet lorsque l'activité solaire est forte, le vent solaire dévie le rayonnement cosmique qui produit ces isotopes. Une forte augmentation des isotopes du carbone traduit donc une activité solaire faible, ou très faible. Quant aux éruptions volcaniques, qu'il faut imaginer extrêmement violentes et courant sur une longue période, on pourrait les mettre en relation avec la dislocation à ce moment-là, entre -2,4 MdA et -2,1 MdA, du supercontinent de Kenorland (qui s'était formé quelque 200 ou 300 millions d'années plus tôt)². A cette époque, du fait de la dérive des continents, le bouclier canadien était relié au bouclier baltique et tous deux se trouvaient sous l'équateur. C'est probablement ce qui explique que l'on continue à trouver des bandes ferrugineuses dans les roches qui se sont formées dans ces boucliers pendant la glaciation huronienne. Quoique fort réduite, cette fois-là, à cet endroit-là, la vie se serait donc maintenue. Comme on l'a vu, les formations de fer rubané se rencontrent jusque vers -1,8 MdA - où la vie semble avoir pris définitivement le dessus. Mais à la lumière de l'épisode huronien peut-être faut-il relativiser les pulsations de la vie que nous avons évoquées plus haut en considérant ces formations de fer rubané. A chaque fois, plutôt que d'une extinction totale de la vie, et d'un redémarrage ultérieur, il faudrait peut-être imaginer des zones entières dévastées et privées de vie tandis que celle-ci se maintenait dans d'autres zones, assurant et facilitant la reconquête ultérieure des zones sinistrées... A une tout autre échelle, on pourrait alors mettre ces pulsations en parallèle avec le phénomène de résilience de la végétation thermophile, liée à la présence de zones refuges, pendant la glaciation plus récente du Würm (entre -110.000 ans et -20.500 ans environ).

La vie en tout cas a poursuivi son cours - et c'était celui de l'Evolution. Il était temps qu'apparussent les premières cellules à noyau (eucaryotes) - capables de reproduction sexuée alors que nos vieilles bactéries se contentaient de se cloner en se séparant en deux. On pensait il y a quelques années encore que cela s'était produit vers -2,8/-2,7 milliards d'années. On croyait en effet avoir retrouvé leurs traces à Pilbara, en Australie occidentale, dans des bitumes

¹ A. Bekker, Lomagundi Carbon Isotope Excursion, ds M. Gargaud, W. M. Irvine, R. Amils, H. J. Cleaves II, D. Pinti, J. Cernicharo Quintanilla, D. Rouan, T. Spohn, S. Tirard, M. Viso, Encyclopedia of Astrobiology, Deuxième édition, New York, Springer, 2014 (2015), pp.1-6.

En ligne : https://www.researchgate.net/publication/283500608_Lomagundi_Carbon_Isotope_Excursion
D. E. Canfield, L. Ngombi-Pemba, E. U. Hammarlund, S. Bengtson, M. Chaussidon, F. Gauthier-Lafaye, A. Meunier, A. Riboulleau, C. Rollion-Bard, O. Rouxel, D. Asael, A.-C. Pierson-Wickmann, A. El Albani, Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere, ds PNAS, 110, 42, octobre 2013, pp. 16736-16741.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/110/42/16736>

² M. E. Barley, A. Bekker, and B. Krapez, Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen. ds Earth and Planetary Science Letters, 238, 2005, pp. 156-171.

En ligne :

https://web.archive.org/web/20080307210911/http://astrobiology.ciw.edu/uploaded/documents/Barley_et_al._2005.pdf

contenant des stéranes¹. Il s'agit de substances chimiques que les Eucaryotes sont capables de synthétiser pour construire leur membrane. Ces Eucaryotes auraient d'ailleurs vécu en communauté avec des algues bleues dont on avait également retrouvé la "signature". Mais cette datation a été revue en 2008 car les anomalies repérées dans ces roches proviendraient d'une contamination plus récente, postérieure à 2,2 MdA². Cette réévaluation a remis en question l'apparition des Eucaryotes, en tout cas dans cette région. Il faudrait y rajeunir leur apparition (entre -1,78 et -1,68 MdA) et celle des cyanobactéries (à -2,15 MdA). De toute façon ce n'étaient pas là les premières cyanobactéries connues - on a vu plus haut que l'on a découvert des fossiles de stromatolithes au Groenland et en Australie vieux respectivement de 3,70 MdA, et de 3,50 MdA environ. Et ce n'étaient peut-être pas, non plus, les traces des tout premiers Eucaryotes. En 1992, une étude avait en effet signalé la présence dans le Michigan d'organismes pluricellulaires enroulés en spirales, appelés *Grypania*³. Ils étaient déjà connus dans le Montana, en Chine et en Inde - mais dans le Michigan ils étaient datés de -2,1 MdA. Or, *Grypania* est généralement considéré comme eucaryote, même si certains auteurs émettent quelques réserves. C'est notamment le cas de l'équipe ayant publié en 2010 la découverte d'autres organismes pluricellulaires découvert au Gabon, également vieux de -2,1 MdA, pouvant atteindre 12 cm de long et présentant un corps central bordé d'une sorte de "jupe" plissée⁴. Il est vrai qu'il reste difficile d'établir la preuve que l'on est bien en présence d'organismes pluricellulaires eucaryotes et non pas de simples amas de bactéries (comme celles produisant les stromatolithes). En 2016, la question s'est encore posée avec la publication d'une collection d'organismes atteignant pour les plus grands 30 cm de long et 8 cm de large. Ils ont été découverts en Chine et sont datés de -1,56 MdA⁵. Malgré tous les problèmes posés, il est donc assez clair que l'on peut créditer les Eucaryotes d'une très grande ancienneté - et ce d'autant plus qu'ils ont dû apparaître, sans laisser de traces, bien avant de former des organismes pluricellulaires⁶... Quant à ces derniers, la datation de -2,1 MdA, obtenue à la fois au Gabon et dans le Michigan, semble pouvoir fournir une bonne base, au moins pour le moment.

¹ Par exemple J. J. Brocks, G. A. Logan, R. Buick, R. E. Summons, Archean Molecular Fossils and the Early Rise of Eukaryotes, ds Science, 285, 5430, août 1999, pp. 1033-1036.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/235240230_Archean_Molecular_Fossils_and_the_Early_Rise_of_Eukaryotes

² B. Rasmussen, I. R. Fletcher, J. J. Brocks, M. R. Kilburn, Reassessing the first appearance of Eukaryotes and Cyanobacteria, ds Nature, 455, 7216, novembre 2008, pp. 1101-1104.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/23410411_Reassessing_the_first_appearance_of_Eukaryotes_and_Cyanobacteria

³ T.M. Han, B. Runnegar, Megascopic eukaryotic algae from the 2.1-billion-year-old neoproterozoic iron-formation, Michigan, ds Science, 257, 5067, juillet 1992, pp. 232-235.

En ligne : <https://science.sciencemag.org/content/257/5067/232>

⁴ A. El Albani, S. Bengtson, D. E. Canfield, A. Bekker, R. Macchiarelli, A. Mazurier, E. U. Hammarlund, P. Boulvais, J.-J. Dupuy, C. Fontaine, F. T. Fürsich, F. Gauthier-Lafaye, P. Janvier, E. Javaux, F. Ossa Ossa, A.-C. Pierson-Wickmann, A. Riboulleau, P. Sardini, D. Vachard, M. Whitehouse, A. Meunier, Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1 Gyr ago, ds Nature, 466, juillet 2010, pp. 100-104.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/nature09166>

⁵ Z. Shixing, Z. Maoyan, A. H. Knoll, Y. Zongjun, Z. Fangchen, S. Shufen, Q. Yuangao, S. Min, L. Huan, Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China, ds Nature Communications, 7, article n°11500, mai 2016,

En ligne : <https://www.nature.com/articles/ncomms11500>

Compte-rendu et discussion critique en français : J. Ignasse, E. Lecomte, La vie complexe est-elle apparue sur Terre un milliard d'années plus tôt que prévu ? ds Sciences et Avenir en ligne, 19.05.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/biologie-cellulaire/la-vie-complexe-est-elle-apparue-sur-terre-un-milliard-d-annees-plus-tot-que-prevu_37942

⁶ Sous la forme de protistes par exemple.

1.2.1. Les végétaux.

1.2.1.1. Les mécanismes de symbiose.

Dès leur origine les Eucaryotes ont été intimement liés à des bactéries, par un mécanisme dit d'endosymbiose. Avant de définir celle-ci, il faut d'abord se pencher sur le terme de symbiose. On qualifie de symbiose l'association intime et durable entre deux organismes, profitable à ces deux organismes, qui sont chacun appelés symbiotes (ou symbiontes) - le plus gros des deux pouvant être, en outre, parfois qualifié d'hôte. La symbiose est sans doute le mécanisme le plus important de la vie sur Terre, et l'un des moteurs les plus puissants de l'Evolution. L'endosymbiose pour sa part, qui préside à l'apparition des Eucaryotes, est une symbiose opérée au cœur même de la cellule - au point que les partenaires, désormais confondus, perdent chacun au fil des générations certaines de leurs fonctions originelles, dorénavant assurées par l'autre partenaire (ou symbionte). Pour éviter les doublets, la Nature (qui se confond ici avec l'Evolution) fait donc des coupes... Mais ensuite il devient pratiquement impossible de dissocier les deux partenaires de l'endosymbiose, qui ne peuvent plus survivre seuls puisqu'il leur manque des fonctions vitales¹. La première endosymbiose connue chez les Eucaryotes - et elle est fondatrice de la lignée - est celle des mitochondries². On pense qu'il s'agit de bactéries appartenant au groupe des alphaprotéobactéries³ qui se sont associées à des archées⁴ (potentiellement une des hypothétiques archées d'Asgård)⁵ pour former le tout-premier Eucaryote. Cela n'est pas négligeable. Car, outre que les mitochondries transmettent certains caractères héréditaires maternels⁶, elles sont encore, et entre autres, associées à la fonction de la respiration⁷ - rien moins qu'essentielle chez les Eucaryotes puisque c'est en respirant que mycètes (champignons)⁸, végétaux et animaux trouvent l'oxygène indispensable pour transformer les sucres et libérer l'énergie nécessaire à leur développement⁹ !

¹ M. A. Selosse, Jamais Seul, Arles, Actes Sud, Babel, 2017, p. 207.

² Chez les Eucaryotes anaérobies, les mitochondries sont remplacées par des hydrogénosomes, qui auraient eux aussi évolué à partir d'une bactérie anaérobie ou d'une archée.

³ M. A. Selosse, Jamais Seul, p. 209.

⁴ Avec les bactéries, les archées constituent les deux grandes lignées des procaryotes - microorganismes unicellulaires ne comportant pas de noyau.

⁵ On a parlé d'un *Lokiarchaeon*, mais il ne s'agit (comme pour toutes les archées d'Asgård d'ailleurs) que d'une construction bio-informatique à partir de fragments d'ADN provenant d'organismes retrouvés dans un échantillon de sol océanique...

Sur ce sujet, voir S. Gribaldo, *Lokiarchaeon*, un chaînon manquant entre archées et eucaryotes ? ds Pour la Science, 26 octobre 2016 (extrait du numéro spécial 469, Le nouveau monde des microbes, novembre 2016)

En ligne (26 octobre 2016) : <https://www.pourlascience.fr/sd/evolution/lokiarchaeon-un-chainon-manquant-entre-archees-et-eucaryotes-9347.php>

Pour les archées d'Asgård (construites à partir de matériel provenant d'un ensemble de sources hydrothermales situé entre le Groenland et la Norvège, et baptisé "château de Loki") voir M.-N. Cordonnier, Les archées d'Asgård toujours plus proches des eucaryotes, ds Pour la science, 6 décembre 2018.

En ligne : <https://www.pourlascience.fr/sd/microbiologie/les-archees-d-asgard-toujours-plus-proches-des-eucaryotes-15155.php>

⁶ Au niveau du génome aussi il y a fusion, le génome des cellules eucaryotes ayant incorporé, utilisé et parfois démultiplié les gènes issus des bactéries endosymbiotiques : voir M. A. Selosse, Jamais seul, p. 224.

⁷ Contrairement à ce qu'a écrit M. Shelldrake (Le monde caché, Paris, Editions First/Pocket, 2021, p. 19) c'est donc grâce aux bactéries, et non aux mycètes, que nous vivons et respirons.

⁸ Le terme de mycète est préférable à celui de champignon, qui désigne une fructification aérienne visible (un carpophore, pour rester technique) et ne concerne de ce fait qu'une toute petite partie (moins de 10 %) de l'immense famille des mycètes.

⁹ M. A. Selosse, Jamais Seul, p. 205.

Vers -1,25 MdA¹, là encore par un processus endosymbiotique, des organismes eucaryotes ancêtres des végétaux (plantes et algues) se sont associés à des cyanobactéries, donnant naissance à nouvelle structure interne spécialisée, comme dans le cas de la mitochondrie. Cette fois-ci il s'agissait d'un plaste. A la différence de la mitochondrie, on en dénombre différentes sortes nées d'acquisitions successives : chloroplastes assurant la fonction chlorophyllienne (elle-même acquise en plusieurs étapes, d'abord seulement la chlorophylle *a* dans les algues rouges, puis la chlorophylle *a* et la chlorophylle *b* dans les algues vertes), amyloplastes capables de stocker des réserves de sucres sous forme d'amidons, leucoplastes synthétisant essences et résines, plus tardivement chromoplastes susceptibles de doter les fruits de couleurs repérables de loin... Les chloroplastes sont obligés (même si certaines plantes les ont perdus par la suite) les autres sont plus ou moins en option. Autre différence importante avec les mitochondries, ces acquisitions de plastes ne concernent pas tous les Eucaryotes mais seulement une part d'entre eux - qui sont devenus les végétaux (plantes et algues). Ou plus exactement des végétaux vrais, car on peut considérer les cyanobactéries comme des proto- ou (plutôt) des pré-végétaux².

Quelque 200 millions d'années (200 Ma) après l'association avec les cyanobactéries - les choses allaient assez lentement - on rencontre le fossile de la première algue rouge connue, *Bangiomorpha pubescens*³, découvert à Somerset Island, dans le grand nord canadien. Et vers -1 MdA, on rencontre les premières traces d'algues vertes découvertes en Chine (*Proterocladus antiquus*)⁴.

1.2.1.2. La difficile sortie des eaux.

¹ T. M. Gibson, P. M. Shih, V. M. Cumming, W. W. Fischer, P. W. Crockford, M. S. W. Hodgskiss, S. Wörndle, R. A. Creaser, R. H. Rainbird, Y. M. Skulski, G. P. Halverson, Precise age of *Bangiomorpha pubescens* dates the origin of eukaryotic photosynthesis, ds *Geology*, 46, 2, février 2018, pp. 135-138.

En ligne : <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/524864/precise-age-of-bangiomorpha-pubescens-dates-the?redirectedFrom=fulltext>

Compte-rendu en français : R. Mulot, La photosynthèse des plantes a démarré il y a 1,2 milliard d'années, ds *Sciences et Avenir* en ligne, 06.01.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/il-y-a-1-2-milliards-d-annees-les-plantes-demarraient-la-photosynthese_119628

² De fait les cyanobactéries ont un mode de vie autotrophe (se nourrissant de sels minéraux puisés autour d'elles) utilisant la capacité de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique par photosynthèse.

³ T. M. Gibson, P. M. Shih, V. M. Cumming, W. W. Fischer, P. W. Crockford, M. S. W. Hodgskiss, S. Wörndle, R. A. Creaser, R. H. Rainbird, Y. M. Skulski, G. P. Halverson, Precise age of *Bangiomorpha pubescens* dates the origin of eukaryotic photosynthesis, ds *Geology*, 46, 2, février 2018, pp. 135-138.

En ligne : <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/524864/precise-age-of-bangiomorpha-pubescens-dates-the?redirectedFrom=fulltext>

Compte-rendu en français : R. Mulot, La photosynthèse des plantes a démarré il y a 1,2 milliard d'années, ds *Sciences et Avenir* en ligne, 06.01.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/il-y-a-1-2-milliards-d-annees-les-plantes-demarraient-la-photosynthese_119628

Les algues rouges sont des organismes ayant acquis la fonction chlorophyllienne (et donc la photosynthèse) mais avec une forme de chlorophylle réduite (chlorophylle *a*). Ce sont des caroténoïdes qui leur donnent leur couleur brun-rouge.

⁴ Q. Tang, K. Pang, X. Yuan, S. Xiao, A one-billion-year-old multicellular chlorophyte, ds *Nature Ecology & Evolution*, 4, février 2020, pp. 543-549.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41559-020-1122-9>

Compte-rendu en français : C. Deluzarche, Cette algue d'un milliard d'années pourrait être à l'origine de toutes les plantes, ds *Futura Planète*, 26.02.2020.

En ligne : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/plante-cette-algue-milliard-annees-pourrait-etre-origine-toutes-plantes-36911/>

Les algues vertes sont des algues contenant une forme de chlorophylle plus complète que les algues rouges (chlorophylles *a* et *b*).

Certaines de ces algues étaient déjà capables de vivre plusieurs heures hors de l'eau, lors des marées. Mais ce n'est pourtant que vers -475 millions d'années (-475 Ma) - pendant l'Ordovicien inférieur - que la vie s'est lancée à la conquête de la terre ferme et que l'on trouve la trace des premiers végétaux terrestres. Celles-ci ne sont pas des fossiles de ces végétaux primitifs, sans doute encore très proches des algues, et plus encore des hépatiques ou des mousses¹ - mais des fossiles de leurs spores ou graines, que l'on a retrouvés aussi bien à Oman qu'en Argentine².

On peut s'interroger sur ce si long délai de 775 millions d'années (-1,25 MdA/-475 Ma). Les raisons sont multiples. D'abord sans doute parce que cela demande une possibilité d'adaptation qui n'a pu s'acquérir très vite. Il fallait que les végétaux apprirent à passer de l'eau salée à l'eau douce. Mais il fallait aussi que la terre devînt habitable pour eux, qu'ils y pussent trouver de quoi se nourrir. La terre minérale en effet (les rochers et le produit de leur érosion) ne contenait pas à l'origine d'aliments pour ceux-ci. La décomposition des roches peut bien libérer quelques sels minéraux mais pas les oligo-éléments indispensables à la vie des plantes. C'est ailleurs qu'il faut chercher ceux-ci - dans la mer encore une fois. Tout le monde connaît les embruns. Ils contiennent beaucoup de sel et sont peu propices à la végétation : c'est pour cela que l'on ne trouve sur les rivages que des plantes halophiles, appréciant le sel. Mais il existe une autre sorte d'embruns, plus fins. Ils forment ce que l'on appelle l'aérosol marin ultra-fin, ou aérosol marin de deuxième type, par opposition aux embruns très salés du bord de mer. Leur processus de formation est intéressant. Lorsqu'une vague se casse, par mer peu agitée, elle crée en tombant de petites bulles qu'elle entraîne sous l'eau jusqu'à quelques centimètres ou quelques décimètres de profondeur. Ensuite, bien sûr, ces bulles remontent, et quand elles arrivent à la surface elles explosent. Mais en deux temps. Le premier, l'explosion de la bulle à proprement parler, est relativement faible. Le second correspond à un choc en retour de la part de la surface de l'eau, au remplissage du creux laissé par le fond de la bulle. Et il possède suffisamment de force pour envoyer dans l'air quelques micro-gouttelettes qui sont assez fines pour s'évaporer au lieu de retomber dans la mer : c'est l'aérosol marin ultra-fin. Celui-ci peut monter jusqu'à plusieurs centaines de mètres d'altitude où il se mélange intimement à l'eau des nuages. Il peut alors être transporté jusqu'à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres des côtes. Et il fournit à terme quelques micro-grammes de sel et d'oligo-éléments par litre d'eau de pluie³. C'est cela qui a rendu la terre fertile - et c'est encore cela qui assure aujourd'hui une partie de la fertilité des sols⁴, au-delà de la décomposition de l'humus (la terre végétale) et en-dehors des engrais organiques que les animaux (et l'homme) peuvent fournir. On comprend cependant qu'au départ, il a fallu du temps !

1.2.1.3. L'acquisition des racines : le rôle des mycètes.

Car ce n'était pas tout : il fallait encore pouvoir utiliser les oligo-éléments apportés par les aérosols marins ultra-fins. Et pour cela, pour être vraiment efficace, pour faire de belles tiges solides, il fallait des racines. Or, de racines, il n'y en avait pas. Les algues et les bactéries n'en

¹ Regroupées dans les Embryophytes, ces plantes n'ont ni racines (remplacées par des rhizoïdes leur permettant de s'ancrer au sol, comme les rhizines chez les lichens) ni lignine qui leur permettrait de développer de fortes tiges rigides. On les considère comme les intermédiaires entre les algues et les plantes.

² C. H. Wellman, P. Osterloff, U. Mohiuddin, Fragments of the earliest land plants, ds *Nature*, 5, 6955, octobre 2003, pp. 282-285.

En ligne : https://www.researchgate.net/publication/9886708_Fragments_of_the_earliest_land_plants42

C. V. Rubinstein, P. Gerrienne, G. S. de la Puente, R. A. Astini, P. Steemans, Early Middle Ordovician evidence for land plants in Argentina (eastern Gondwana), ds *New Phytologist*, 188, 2, octobre 2010, pp. 365-369.

En ligne : <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2010.03433.x>

³ Sur le sujet, voir J. Labeyrie, L'homme et le climat, Paris, Denoël, 1993, pp. 60-70, notamment fig. 3 p. 63.

⁴ Il n'y a qu'à voir la différence dans un jardin entre un arrosage et une pluie (quand il ne s'agit pas d'une pluie trop chargée en sable d'Afrique du Nord).

avaient pas besoin : elles trempaient dans des mers riches en oligo-éléments. Lorsqu'elles sont sorties de la mer, elles n'ont donc pu produire qu'un biofilm très fin¹, capable d'absorber les oligo-éléments déposés par les aérosols marins, mais pas d'aller plus loin. Et il ne fallait pas demander beaucoup plus aux premiers végétaux terrestres, mousses ou plutôt hépatiques évoqués plus haut, qui sont venus un peu plus tard. Ils avaient des rhizoïdes pour s'accrocher au sol, mais rien pour exploiter celui-ci au-delà de leur surface de contact. Pour dépasser ce stade, dans la logique primordiale de la symbiose, qui a guidé si souvent l'évolution, la meilleure solution relevait de l'association. Les partenaires seraient cette fois-ci... des champignons - ou plutôt, pour employer un terme à la fois plus technique et plus juste, des mycètes². Car le terme de champignon, qui désigne une fructification aérienne visible (un carpophore, pour rester technique)³ ne concerne qu'une toute petite partie des mycètes...

Ces derniers ont colonisé absolument tous les milieux. Il existe donc des mycètes marins⁴. Et ceux-ci ont très tôt utilisé leur faculté de décomposer les roches pour en extraire les sels minéraux, en même temps que celle de s'associer de manière symbiotique un peu à tout ce qui se trouvait là - de la même manière que leurs vieilles concurrentes (et souvent alliées) les bactéries. Certaines algues ont rapidement profité de la rencontre. La symbiose algue-mycète a ainsi donné naissance à la plupart des lichens⁵ - et d'abord sans doute aux lichens aquatiques, d'eau douce ou de mer⁶. Mais bien d'autres symbioses, plus superficielles, ont dû se mettre en

¹ Sur ce biofilm, voir M. A. Selosse, Jamais seul, Arles, Actes Sud, Babel, 2017, pp. 82-83.

² Du grec μύκης, *mykês* (champignon). Egalement appelés fonges, du latin *fungi* (champignons) conservé tel quel en anglais.

³ Maintenant on dit souvent un sporophore - mais cela ne fait qu'embrouiller les choses, comme de changer les noms attribués aux lichens pour leur donner ceux de lichenologues célèbres, dont on peut vraiment se demander la finalité... mis à part l'*ego* des chercheurs qui peuvent s'inscrire sur la liste, ou la volonté de rendre leur science encore plus opaque et réservée aux seuls spécialistes.

⁴ Pour le moment, on ne connaît pas de champignons de mer, mais on en connaît au moins une forme complètement aquatique. C'est la psathyrelle aquatique (*Psathyrella aquatica*) décrite en 2010, seule espèce connue de champignon (à lamelles) qui ne semble vivre que dans l'eau, ou sous l'eau (douce). On en connaît encore une autre, mais amphibie celle-là, décrite en 2013 : c'est la pezize brun-olive (*Peziza oliviae*) qui produit un fruit (champignon, ou carpophore) en forme de coupe, sans lamelles, de couleur brun-olive comme son nom l'indique. J. L. Franck, R. A. Coffan, D. Southworth, Aquatic gilled mushrooms, *Psathyrella* fruiting in the Rogue River in southern Oregon, ds *Mycologia*, 102, 1, 2010, pp. 93-107.

En ligne : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3852/07-190?journalCode=umyc20>

J. L. Franck, The olive goblet, *Peziza oliviae*, a new cup fungus growing underwater in Oregon, ds *Mycotaxon*, 126, Octobre-décembre 2013, pp. 183-190.

<https://www.ingentaconnect.com/content/mtax/mt/2013/00000126/00000001/art00024;jsessionid=3noumorkjd7ue.x-ic-live-01>

⁵ La symbiose lichénique peut aussi impliquer des cyanobactéries.

Globalement, dans 86-87 % des cas, on trouve une (ou des) algue(s) associée(s) à un ou plusieurs mycètes, dans 10 % des cas, une cyanobactérie associée à un mycète - et dans 3-4 % des cas, une association des 3 types de partenaires.

Depuis quelques années on a découvert la possibilité d'autres partenaires en plus de ceux-ci : des levures (autres mycètes), des protistes (micro-organismes eucaryotes à organisation cellulaire simple, autres qu'un animal, un mycète ou une plante, par exemple une amibe), voire virus...

Sur la répartition citée : F. Högnabba, S. Stenroos, A. Thell, L. Myllys, Evolution of cyanobacterial symbioses in Ascomycota, ds A. Aptroot, M. R. D Seaward, L. B Sparrius (dir.), *Biodiversity and Ecology of Lichens Liber Amicorum Harrie Sipman*, Bibliotheca Lichenologica, 99, Berlin, Cramer, 2009, pp. 163-184.

En ligne (résumé) : <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/evolution-of-cyanobacterial-symbioses-in-ascomycota>

⁶ Alors que c'est le mycète qui fournit ordinairement la structure externe du lichen (notamment pour protéger l'algue lors des périodes de sécheresse) pour les lichens aquatiques c'est généralement l'algue qui procure l'enveloppe externe.

Il n'est pas exclu toutefois qu'il existe des lichens aquatiques, voire marins, à structure externe produite par des mycètes aquatiques. Simplement il s'agit toujours de lichens incrustés sur les roches (on les dit crustacés) et dans l'eau ils sont très difficiles à distinguer de celles-ci.

place. On a de la sorte avancé que c'est parce qu'il y avait eu des associations précoces entre mycètes et algues que ces dernières n'ont pas développé de racines¹, les premiers extrayant pour elles les sels minéraux (et en particulier le précieux phosphore)².

La flore de Rhynie (en Ecosse, dans le comté d'Aberdeen) va nous fournir un exemple un peu plus tardif, mais très instructif. Elle date du Dévonien inférieur (vers -410 Ma). Elle offre une bonne illustration de ce qui a pu se passer pour passer du biofilm originel à une véritable végétation³. Dans un milieu de sources hydrothermales très riche en sels minéraux, des mycètes (appartenant très probablement à la famille des Gloméracées, toujours bien représentée aujourd'hui) se sont associés à certains végétaux intermédiaires entre les algues et les plantes (sans doute des hépatiques déjà mentionnées) - dans le cadre de ce que l'on nommera plus tard une symbiose mychorizienne⁴. C'est ainsi que l'on qualifie l'association d'une plante et d'un mycète passant par les racines du premier et le mycélium du second⁵. Sauf que là, il vaut peut-être mieux parler de symbiose pré-mycorhizienne, puisqu'il n'y avait pas de racines ! Il n'y avait que des tiges, longues au maximum de 10 à 25 cm, rampantes, dressées, ou dans certains cas souterraines (des rhizomes). La symbiose s'est donc effectuée au niveau de la partie rampante du végétal, ou dans ses rhizomes. Comme pour les algues à symbiose superficielle évoquées plus haut, et comme pour les symbioses mycorhiziennes qui viendront plus tard, cette symbiose n'affecte pas tout le végétal... Reste à situer cet épisode. Car il faut probablement le remonter bien avant le Dévonien inférieur de la flore de Rhynie. Pour M. A. Selosse il a pu se produire très tôt, peu de temps (à l'échelle géologique) après l'apparition des premiers végétaux aériens vers -475 Ma. Il évoque en effet un laps de temps de 80 millions d'années pour voir apparaître les racines⁶. Or on trouve les premières traces de celles-ci vers -390/-385 Ma sur les sites de Gilboa et de Cairo dans l'état de New York aux Etats-Unis, avec *Eospermatopteris* (aussi appelé *Wattieza givetiana*, qui ressemblait un peu à un palmier, avec un gros pied et une couronne de branches sans feuilles) et le plus moderne *Archaeopteris*⁷ (avec des feuilles et un système racinaire assez proches de certains conifères, épicéas ou pins)⁸. La symbiose avec les premiers végétaux terrestres, même partielle, avait donc fini ici par produire un nouvel organe. Il semble à peu près certain aujourd'hui que ces racines étaient destinées en premier lieu à faciliter les échanges avec les mycètes, bien plus qu'à exploiter directement les ressources du sol⁹. En tout

¹ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 85.

² Les mycètes ont la faculté de transporter et de stocker les sels minéraux (et notamment le phosphore) dans leurs hyphes - à défaut d'organes spécialisés. Or le phosphore est essentiel pour les plantes (et tous les Eucaryotes) en particulier parce qu'il est l'un des principaux constituants des acides nucléiques qui portent l'information génétique (acides ribonucléique ou ARN et désoxyribonucléique ou ADN).

³ M. A. Selosse, Jamais seul, pp. 83-84 ; L'origine du monde, Arles, Actes Sud, 2021, pp. 259 et s.

⁴ On peut dire qu'il s'agissait là de mycorhizes sans... -rhizes : en effet myco- vient du grec μύκης (mukès, champignon, d'où mycète) et ρίζα (*rhiza*, racine).

⁵ Le mycète apporte des sels minéraux (qu'il peut extraire des sols et des roches) ainsi que de l'eau (que le mycélium peut aller chercher bien mieux et bien plus loin que le réseau racinaire de la plante). Cette dernière apporte les sucres quelle fabrique par photosynthèse, dont le mycète a besoin et qu'il ne peut pas synthétiser.

⁶ M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 261.

C'est sans doute la présence d'associations précoces entre algues et mycètes, en amont des Bryophytes, qui a favorisé cette rapidité.

⁷ A ne pas confondre avec l'*Archaeopteryx*, le fameux petit dinosaure à plumes, dont il sera question plus bas.

⁸ W. E. Stein, C. M. Berry, J. L. Morris, L. Van Aller Hernick, F. Mannolini, C. Ver Straeten, E. Landing, J. E. A. Marshall, C. H. Wellman, D. J. Beerling, J. R. Leake, Mid-Devonian *Archaeopteris* Roots Signal Revolutionary Change in Earliest Fossil Forests, ds Current Biology, 30, 3, février 2020, pp. 421-431.

En ligne :

[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(19\)31569-](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(19)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh)

[6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(19)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh)

owall%3Dtrue

⁹ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 85 ; L'origine du monde, p. 261.

cas la symbiose pré-mycorhizienne a été profonde : le mycète a pénétré jusqu'à l'intérieur des cellules de l'hôte, qu'il a fini par transformer.

De fait les Gloméracées développent à l'intérieur de chaque cellule une espèce de micro-arborescence destinée à favoriser les échanges (c'est-à-dire, en ce qui concerne le mycète, à absorber au mieux les sucres produits par la plante). La symbiose est donc très intime. Aujourd'hui on range les Gloméracées sous le nom global de champignons mycorhiziens à arbuscules (abrégié en CMA)¹ - et pour leurs associations à l'intérieur même des cellules des plantes partenaires (mais cette fois-ci sans création de nouveaux organes) on parle d'endomycorhizes². Celles-ci se distinguent des ectomycorhizes plus superficielles³ qu'utilisent par exemple la truffe (assez bien perçue parce que le champignon souterrain croît près des racines) mais aussi la girolle, le cèpe ou le lactaire... entre bien d'autres.

Un dernier mot sur les Gloméracées, spécialistes des endomycorhizes : leurs capacités exceptionnelles de collecter des sels minéraux et de l'eau utilisables par leurs hôtes les font de nos jours cultiver et utiliser tant pour augmenter le rendement des céréales (quand on veut se passer de pesticides et de désherbants) que pour fournir en eau des arbres placés dans des conditions de désertification. Ce sont des Gloméracées (en particulier *Glomus aggregatum* et *Glomus intraradices*) qui sont utilisés en association dans la Grande Muraille Verte du Sahel⁴. C'est loin... mais on devrait sans doute se dépêcher d'en promouvoir un équivalent en Afrique du Nord (en particulier en Tunisie ou le littoral n'est pas protégé par un écran montagneux) avant que le sable ait atteint la Méditerranée - ne serait-ce, fort égoïstement, que parce que l'Europe est située juste de l'autre côté...

La fonction première des racines ne serait donc pas de nourrir la plante par leurs propres moyens, mais par l'intermédiaire de leurs mycètes symbiotiques (en exploitant les capacités très largement supérieures de ceux-ci pour se procurer des sels minéraux et de l'eau).

¹ L'acronyme AMF (pour *arbuscular mycorrhizal fungi*) utilisé en anglais est plus juste que celui de CMA (champignons mycorhiziens à arbuscules) dans la mesure où les Gloméracées ne forment pas de carpophore, et n'étant donc pas à proprement parler des champignons, il emploie un mot (*fungi*) moins restrictif que celui de champignon. Pour être parfaitement rigoureux il eût peut-être fallu dire mycètes mycorhiziens à arbuscules (MMA) ou encore fonges mycorhiziens à arbuscules (FMA) correspondant à l'anglais...

² Les endomycorhizes concernent assez peu d'espèces de mycètes (150 à 200 connues) mais elles peuvent s'effectuer avec 70 % (71 % selon M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 320-321) voire 80 % (M. A. Selosse, Jamais seul, pp. 33, 84) des espèces végétales - sans doute parce que ces endomycorhizes sont très apparues très tôt et ont eu beaucoup de temps pour se mettre en place. Elles touchent préférentiellement les plantes à faible taux de lignine mais aussi des arbustes et des arbres (en particulier les arbres fruitiers de longévité limitée, mais aussi les robiniers faux acacia, les noisetiers, les érables ou les peupliers).

³ Les ectomycorhizes ne concernent que 5% à 10% des espèces végétales (et même seulement 2 % pour M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 323) mais plusieurs dizaines de milliers d'espèces de mycètes dont 80 % des mycètes dits supérieurs (appelés aussi Macromycètes, ceux qui forment des carpophores visibles ou champignons) avec pour partenaires préférés les arbres et arbustes, feuillus ou résineux, ainsi que les plantes vivaces à longue durée de vie. Ce type d'association aurait commencé au moment de l'apparition des pins, vers -140 Ma (M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 324).

Il faut noter que certains arbres sujets à l'endomycorhize restent ouverts à l'ectomycorhize (en particulier s'ils sont en contact avec de grands feuillus ectomycorhizés) : c'est notamment le cas du noisetier.

Enfin certains arbres ou arbustes de grande longévité peuvent accueillir successivement une endomycorhize et plus tard une ectomycorhize. C'est le cas des hêtres, des tilleuls, des chênes, des châtaigniers, des noyers, des frênes, des figuiers, des oliviers ou encore des pins et des genévriers.

Voir à ce sujet : N. Leroux, Mycorhizes, Les ectomycorhizes pour les feuillus, les résineux et les plantes vivaces, ds Permaforêt, 31 janvier 2014.

En ligne : <https://permaforet.blogspot.com/2014/01/mycorhizes-les-ectomycorhizes-pour-les.html>

⁴ A. M. Bâ, T. Guissou, R. Duponnois, C. Planchette, O. Sacko, D. Sidibé, K. Sylla, B. Windou, Mycorhization contrôlée et fertilisation phosphatée, Applications à la domestication du jujubier, arbre fruitier forestier sahélien, ds A. Dia, R. Duponnois (dir.), La Grande Muraille Verte, Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux, Marseille, IRD Editions, 2012, pp. 251-262.

En ligne : <https://books.openedition.org/irdeditions/3300?lang=fr>

Pour l'ouvrage entier : <https://books.openedition.org/irdeditions/3247>

1.2.1.4. L'acquisition de la lignine, les plantes vasculaires, les fleurs.

A peu près au moment où les végétaux se dotaient de racines, vers -395 Ma (pendant le Dévonien toujours) on rencontre chez certains des axes dépassant 10 cm de diamètre qui témoignent probablement de l'acquisition de la lignine¹.

Celle-ci a plusieurs fonctions. Pour les arbres, par exemple, elle reste présente dans les cellules des parties mortes autour desquelles les troncs et les branches des arbres grandissent : c'est elle qui leur confère résistance et solidité. Mais ce n'est pas tout. Dans les parties vivantes de l'arbre (la périphérie du tronc et des branches)² elle joue encore un rôle dans la circulation de la sève. Ce n'est certes pas la lignine qui fait monter celle-ci : c'est principalement la transpiration de la plante qui s'effectue au niveau de ses feuilles³. Mais comme la lignine est hydrophobe, elle contribue à empêcher la sève de redescendre vers le sol par gravité⁴ : elle assure là, en quelque sorte, le rôle d'une multitude de micro-clapets anti-retour.

Les racines (apparues vers -390/-385 Ma)⁵ n'étaient pas indispensables : les mousses et les hépatiques s'en passent très bien. Mais elles ont apporté un surplus de ressources très conséquent. Cela a permis aux plantes de synthétiser la lignine, et par là même de former les tiges plus hautes et plus résistantes des plantes vasculaires. Il allait devenir possible à la végétation de se développer sur plusieurs niveaux ou strates (herbacée, arbustive, arborescente) et ainsi de mieux remplir l'espace disponible.

Il faudra toutefois attendre encore bien longtemps, plus de 200 Ma, pendant le Jurassique inférieur, pour voir apparaître les premières plantes à fleurs ou Angiospermes.

Après avoir longtemps situé cette apparition vers -125 Ma (pendant le Crétacé) la découverte de *Nanjinganthus dendrostyla* effectuée en Chine, et publiée en 2018, les a en effet vieillies de quelque 50 Ma, vers -174 Ma⁶ - on serait tenté de dire *au moins*, car l'histoire récente de leur apparition illustre à quel point bien notre savoir est provisoire... et ce, en dépit des certitudes affichées par certains chercheurs. C'est à juste titre que des historiens comme M. Pastoureau,

¹ B. Meyer-Berthaud, A.-L. Decombeix, L'évolution des premiers arbres : les stratégies dévoniennes, ds Comptes Rendus Palevol, 8, 2-3, mars-avril 2009, pp. 155-165.

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631068308001358>

Les formes que pouvaient revêtir ces arbres (par exemple des sortes de prêles géantes de 30 mètres de haut) n'ont cependant rien de commun avec ce que nous nommons arbres aujourd'hui.

² L. Tillon, Être un chêne, p. 66.

³ L. Tillon, Être un chêne, pp. 66 et s.

⁴ L. Tillon, Être un chêne, p. 72.

Sur un autre rôle de la lignine dans la lutte contre les parasites, L. Tillon, op. cit., p. 173 (création de "loupes", ou encore de "balais de sorcières").

⁵ M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 261.

W. E. Stein, C. M. Berry, J. L. Morris, L. Van Aller Hernick, F. Mannolini, C. Ver Straeten, E. Landing, J. E. A. Marshall, C. H. Wellman, D. J. Beerling, J. R. Leake, Mid-Devonian *Archaeopteris* Roots Signal Revolutionary Change in Earliest Fossil Forests, ds Current Biology, 30, 3, février 2020, pp. 421-431.

En ligne :

[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(19\)31569-](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(19)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh)

[6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(19)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsh)
oall%3Dtrue

⁶ Q. Fu, J. B. Diez, M. Pole, M. G. Avila, Z.-J. Liu, H. Chu, Y. Hou, P. Yin, G.-Q. Zhang, K. Du, X. Wang, An unexpected noncarpellate epigynous flower from the Jurassic of China, ds eLife, 7, décembre 2018.

En ligne : <https://elifesciences.org/articles/38827>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, La toute première fleur connue s'est ouverte il y a 174 millions d'années, ds Sciences et Avenir en ligne, 21.12.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/fleurs-la-premiere-s-est-ouverte-il-y-a-174-ma_130406

Il s'agit de *Nanjinganthus dendrostyla*.

bien conscients du passage du temps, affirment que dans quelques siècles ces certitudes feront rire ou sourire¹ - on pourrait juste ajouter aujourd'hui si l'humanité survit jusque-là...

Mais il n'y avait pas que les bactéries et les plantes. Il faut également compter avec les animaux - et encore d'autres formes de vie que nous avons parfois déjà évoquées, et sur lesquelles il faudra bien s'étendre car elles ouvrent des perspectives assez vertigineuses.

1.2.2. Les animaux.

Pour rencontrer les premiers animaux, il faut retourner en arrière, et même assez loin en arrière. On a longtemps cru qu'ils étaient apparus pendant ce que l'on a appelé l'explosion cambrienne. Le Cambrien est la première période de l'ère primaire (ou Paléozoïque) qui succède vers -541 Ma au long Précambrien. Le terme d'explosion cambrienne désigne un foisonnement des formes de vie, en tout cas à une diversification importante de celles-ci. On ne connaît pas vraiment sa durée : une dizaine de millions d'années pour certains, mais d'autres la créditent de 20 ou 30 Ma. On peut imaginer qu'elle a pu connaître son apogée vers -530 Ma.

1.2.2.1. Des débuts difficiles... à discerner.

Mais aujourd'hui on a tendance à penser que les animaux étaient apparus bien avant l'explosion cambrienne. On a trouvé dans certaines roches, datées entre -635 Ma et -541 Ma, des biomarqueurs qui pourraient constituer la signature d'animaux primitifs. En 2016, des chercheurs ont ainsi analysé une molécule, un stérane encore, proche cette fois du cholestérol, qui pourrait traduire la présence d'éponges fossiles. Mais il est également produit par certaines algues. Ce n'est qu'avec une projection génétique que l'on a déduit que ce stérane était apparu chez les éponges avant les algues - et que l'on pouvait situer l'apparition des premières pendant l'Ediacarien, la dernière séquence du Précambrien, entre -635 et -541 Ma². Autant dire que c'est assez incertain car ces projections, malgré leur caractère souvent catégorique, sont fréquemment inexacts³.

En 2018, on est parti de quelque chose de plus solide. Il s'agit de fossiles de *Dickinsonia*. Ce sont des organismes plats, de forme ovale légèrement élargie vers l'avant, dotés d'une nervure médiane et de nervures secondaires attachées de part et d'autre de celle-ci, et sans appareil digestif externe (pas de bouche, pas d'anus). Leur taille pouvait varier de quelques millimètres à plus d'un mètre. On en a trouvé des milliers de spécimens fossilisés. On a longtemps hésité, pour les situer, entre des organismes unicellulaires (des amibes géantes, on en découvrira d'autres plus bas), des lichens, ou des animaux marins. Finalement, sur la base de stéranes (encore une fois de type cholestérol) on les a attribués au monde animal⁴. Ce qui fait la

¹ Par exemple M. Pastoureau, La symbolique médiévale, matériaux, nombres, gestes, images et couleurs, Conférence du 23 janvier 2017 à l'Université de Cergy-Pontoise avec les archives départementales du Val d'Oise (vers 58'25 et encore vers 1h08'30).

En ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=oKsjwZRmSVk>

² D. A. Gold, J. Grabenstatter, A. de Mendoza, A. Riesgo, I. Ruiz-Trillo, R. E. Summons, Sterol and genomic analyses validate the sponge biomarker hypothesis, ds PNAS, 113, 10, mars 2016, pp. 2684-2689.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/113/10/2684>

³ Voir à ce titre, entre bien d'autres, M. E. Brookfield, E. J. Catlos, S. E. Suarez, Myriapod divergence times differ between molecular clock and fossil evidence, U/Pb zircon ages of the earliest fossil millipede-bearing sediments and their significance, ds Historical Biology, 32, mai 2020.

En ligne : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08912963.2020.1762593?journalCode=ghbi20>

⁴ I. Bobrovskiy, J. M. Hope, A. Ivantsov, B. J. Nettersheim, C. Hallmann, J. J. Brocks, Ancient steroids establish the Ediacaran fossil *Dickinsonia* as one of the earliest animals, ds Science, 361, 6408, septembre 2018, pp. 1246-1249.

En ligne : <https://science.sciencemag.org/content/361/6408/1246>

Il semble toutefois que l'on a négligé la piste des algues susceptibles de fabriquer ces stéranes.

différence avec les molécules évoquées ci-dessus, c'est que l'on dispose là de véritables fossiles, que l'on peut dater entre -571 Ma et -541 Ma. Il semble que *Dickinsonia* se soit nourri en absorbant, par l'intermédiaire de sa paroi, les organismes qui entraient à son contact. Cela n'aurait rien d'extraordinaire. De nos jours un genre d'algue unicellulaire, *Euglena*, qui vit en eau douce ou en mer selon les espèces, est capable de perdre occasionnellement sa chlorophylle, et de survivre en se nourrissant de matière organique qu'elle absorbe à travers sa membrane - exactement comme pouvait le faire *Dickinsonia* (dont on ignore toutefois si pour sa part il possédait de la chlorophylle et cette capacité de doubler ses ressources). On ne connaît pas de fossile d'euglène. On pensait néanmoins il y a quelques années qu'elle était très ancienne et que c'était peut-être l'ancêtre de tous les animaux. Pendant longtemps en effet, on a cru qu'*Euglena* était un cas unique, ou très rare. On a toutefois découvert que des milliers (ou des millions) d'espèces d'algues unicellulaires sont capables d'en faire autant. Tous ces organismes se situent au niveau du plancton. Ils ont été qualifiés de mixotrophes, parce qu'ils sont susceptibles pour se construire d'utiliser les deux manières de s'alimenter des autotrophes (qui absorbent pour cela les sels minéraux qui les entourent) et des hétérotrophes (qui absorbent de la matière organique). L'étude des mixotrophes a permis de leur assigner un rôle majeur au sein de la vie marine¹. Un peu comme on a vu qu'on pourrait qualifier les cyanobactéries de pré-végétaux, on pourrait être tenté de les considérer comme des pré-plantes carnivores². Mais à la différence de celles-ci, les mixotrophes ont la faculté de se déplacer (ce qui les rapproche des animaux bien que tous les animaux n'aient pas cette capacité). Comme il s'agit d'organismes unicellulaires, ils le font à l'aide d'un flagelle. On peut essayer d'approcher l'origine de ce dernier en considérant une autre algue unicellulaire, *Cystodinium*, qui existe vraisemblablement à la surface de la Terre depuis des centaines de millions d'années. *Cystodinium* se reproduit à l'aide d'une spore munie d'un cil lui permettant de nager. Or on a pu observer que parfois (probablement par un dysfonctionnement génétique) cette spore "oublie" de devenir adulte et conserve son flagelle toute son existence, créant un mutant du nom de *Peridinium*. Ce dernier conserve les caractères d'une algue mais il peut se déplacer grâce à son flagelle. Curieusement, sa paroi est munie d'une légère dépression, faisant penser à une bouche, qui ne lui sert apparemment à rien. Cependant une troisième mutation, *Gymnodinium*, ne possède plus de

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, *Dickinsonia*, le premier animal vivait il y a 558 millions d'années, ds Sciences et Avenir en ligne, 21.09.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archo-paleo/paleontologie/dickinsonia-le-premier-animal-vivait-il-y-a-558-ma_127796

¹ Sur les mixotrophes, on peut lire l'article passionnant d'A. Mitra, Le règne des plantes-garous, ds Pour la Science, Hors-série n° 101, novembre-décembre 2018, pp. 78-84.

En ligne : <https://www.pourlascience.fr/sd/biologie/le-regne-des-plantes-garous-14844.php>

² Certaines plantes, notamment des orchidées, sont également qualifiées de mixotrophes par qu'elles ont acquis la capacité d'absorber les mycètes mycorhiziens microscopiques qui poussent le long de leurs racines. C'est le cas du monotrope (*Hypopitys monotropa*) ou sucepin, de la famille des Éricacées, une plante assez commune au début de l'été dans la montagne de Lure. Il établit une relation avec les pins qui l'entourent par l'intermédiaire de mycorhizes dont il se nourrit. C'est accessoire, mais ces mycorhizes appartiennent à la vaste famille des tricholomes qui est aussi, entre autres, celle des grisets (tricholomes terreux et tricholomes prétentieux). Ces plantes que l'on qualifiait jadis de saprophytes (pas du tout parce qu'elles profitent des mycorhizes, mais parce qu'on croyait qu'elles pouvaient absorber directement les matières végétales en décomposition) sont appelées mycohétérotrophes depuis qu'on a reconnu leur façon de se nourrir.

Sur le sujet, voir M. A. Selosse, M. Roy, Les plantes qui mangent des champignons, ds Pour la Science, Dossier n° 77, Octobre 2012, pp. 102-107 (en particulier p. 103 pour le monotrope et ces tricholomes).

En ligne : http://isyeb.mnhn.fr/IMG/pdf/dossier_77_p102107_selosse.pdf

Sur le cas précis des orchidées, qui représentent en gros 50% de ces plantes mixotrophes (et mycohétérotrophes), voir F. Lallemand. Evolution des interactions mycorhiziennes et de la mycohétérotrophie chez les orchidées, Thèse, Mycologie. Muséum national d'histoire naturelle de Paris (MNHN Paris), 2018.

En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02123918>

chlorophylle - mais une vraie bouche¹ lui permettant véritablement de "manger" d'autres cellules... Au final il n'est donc pas si facile de chercher l'origine des animaux !

1.2.2.2. De la mer à la terre, d'abord les invertébrés.

Par la suite, avec l'apparition d'organismes pluricellulaires, on dispose de jalons plus clairs, et on peut en mentionner quelques-uns ici.

Entre -540 et -530 Ma, on rencontre les premiers trilobites. Ce sont des arthropodes marins qui ressemblent très vaguement à des cloportes. Abondants et bien connus dans toutes leur variété, ils servent parfois à dater les couches dans lesquelles on les trouve. On en voit souvent sur les étalages des vendeurs de fossiles. En 2017, en Estonie, on en a retrouvé un spécimen fossile daté de -530 Ma sur lequel on a pu étudier les yeux, ce qui en fait une rareté². Une plaque de trilobites fossilisés en file indienne, découverte au Maroc, a par ailleurs suggéré un comportement social³. Ils se sont éteints lors de la grande extinction de la fin du Permien, vers -250 Ma.

C'est sensiblement à la même époque que les trilobites, ou un peu après, vers -530 Ma, que l'on a vu apparaître les ancêtres des poissons représentés par de petits vertébrés cuirassés, sans mâchoire, munis à l'arrière d'un corps plus souple faisant office de nageoire caudale, réunis sous le nom d'Ostracodermes.

Quelques millions d'années plus tard (vers -510/-505 Ma), on trouve un autre groupe de "poissons" toujours dépourvus de mâchoire, et sans doute de nageoires (en-dehors de la partie arrière de leur corps, effilée, jouant toujours le rôle de nageoire caudale), mais débarrassés de leur cuirasse. C'est notamment le cas de *Metaspriggina* découvert sur les sites de Burgess et de Marble Canyon, tous deux en Colombie-Britannique, et de Parker Slate dans le Vermont, que l'on peut rapprocher d'autres espèces connues en Chine (*Haikouichthys* et *Myllokunmingia*, sur le site de Chengjiang, au Yunnan)⁴. Les modernes lamproies en seraient assez vraisemblablement les descendantes.

Pendant l'Ordovicien moyen, vers -465 Ma, sont également bien connus des Euryptérides. Comme pour les trilobites, il s'agit d'arthropodes marins, qui ressemblaient cette fois à de gros scorpions : on les appelle d'ailleurs couramment scorpions de mer. Certains atteignaient plus de 2 mètres de long⁵. En 2015, le plus ancien fossile d'Euryptéride connu datait de -462 Ma environ⁶, et son degré de complexité pouvait laisser supposer, à moins qu'elle ait connu un

¹ J.-M. Pelt, M. Mazoyer, J. Monod, J. Girardon, La plus belle histoire des plantes, Paris, Seuil, 1999, pp. 21-22.

² B. Schoenemann, H. Pärnaste, E. N. K. Clarkson, Structure and function of a compound eye, more than half a billion years old, ds PNAS, 114, 51, décembre 2017, pp. 13489-13494.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/114/51/13489.abstract?sid=3352896f-3d1e-4576-904f-fa4c7ea3f216>

³ J. Vannier, M. Vidal, R. Marchant, K. El Hariri, K. Kouraiss, B. Pittet, A. El Albani, A. Mazurier, E. Martin, Collective behaviour in 480-million-year-old trilobite arthropods from Morocco, ds Scientific Reports, 9, octobre 2019 (janvier 2020), article n° 14941.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-019-51012-3>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Des trilobites en file indienne : un comportement social vieux de 480 millions d'années, ds Sciences et Avenir en ligne, 17.10.2019.

https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/ces-trilobites-marchaient-ligne-signe-d-un-comportement-social-vieux-de-480-millions-d-annees_138236

⁴ S. Conway Morris, J.-B. Caron, A primitive fish from the Cambrian of North America, ds Nature, 512, août 2014, pp. 419-422.

En ligne : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24919146/>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Voici un des premiers poissons ayant existé, ds Science et avenir, 12.06.2014.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/voici-un-des-premiers-poissons-ayant-existe_20022

⁵ Ils auraient pu grandir ainsi parce que la mer était plus riche en oxygène que de nos jours.

⁶ J. C. Lamsdell, D. E. G. Briggs, H. P. Liu, B. J. Witzke, R. M. McKay, The oldest described eurypterid: a giant Middle Ordovician (Darriwilian) megalograptid from the Winneshiek Lagerstätte of Iowa, ds BMC (BioMed Central) Evolutionary Biology, 15, 169, 2015.

développement foudroyant, que sa lignée était apparue au moins 20 ou 25 Ma auparavant, aux débuts de l'Ordovicien ou à la fin du Cambrien. Comme les trilobites, ils se sont éteints lors de la grande extinction de la fin du Permien.

Ce n'est pas le cas des limules, aussi appelées "crabes fer à cheval" - bien que ce soient des arthropodes¹, et non des crustacés. Connues il y a 445 Ma, et apparues sans doute dès -478 Ma², elles se présentent sous la forme d'un animal à la carapace dorsale en forme de fer à cheval, muni d'une queue fine comme un aiguillon et de pattes dans la partie ventrale, sous la carapace bombée. Elles peuvent atteindre 40 à 50 cm de diamètre et vivre une trentaine d'années. Aquatiques, elles peuvent également s'aventurer sur la terre ferme. Malheureusement pour elles, leur sang bleu - on les appelle aussi "crabes à sang bleu" - à la propriété de permettre de détecter les bactéries. En plus de la consommer, on l'utilise donc en médecine pour s'assurer qu'il n'y a pas de contamination. Malheureusement, la surpêche occasionnée met aujourd'hui en danger l'espèce, qui a pourtant résisté à la grande extinction du Permien et à toutes les vicissitudes de la planète depuis. On relâche en effet les limules après avoir pris 30 % environ de leur sang, et personne ne s'était vraiment soucié de leur devenir jusqu'à ce qu'on découvre que 29 % au moins d'entre elles ne survivent pas longtemps après ça - sans compter celles qui meurent en laboratoire³...

Vers -439 Ma, il nous faut retourner aux poissons primitifs. C'est en effet de cette époque que l'on date pour l'instant le premier poisson à mâchoire, *Qianodus duplicis*, retrouvé sur le site de Rongxi, dans la province chinoise de Guizhou⁴. Malheureusement il n'est connu que par ses dents et quelques fragments de mâchoire et on ne sait rien de son aspect, malgré les représentations qui en ont été publiées ici ou là... Il semble clair toutefois à ses découvreurs qu'il s'inscrit dans un schéma évolutif commencé avant lui, sans doute avant et immédiatement après l'extinction massive de la fin de l'Ordovicien (vers -443 Ma) et peut-être même plus précocement dans le cadre de la bio-diversification de l'Ordovicien qui prend place entre -485 et -445 Ma⁵. Contemporain de *Qianodus duplicis* sur le site de Rongxi (mais peut-être un peu plus récent puisque daté exclusivement du Silurien inférieur qui débute vers -443 Ma et prend fin vers -427 Ma) la même équipe de chercheurs a présenté *Fanjingshania renovata*⁶ doté lui

En ligne : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26324341/>

¹ Des Chélicérites, comme les araignées et les scorpions, mais pas des Arachnides comme ceux-ci.

² D. M. Rudkin, G. A. Young, G. S. Nowlan, The Oldest Horseshoe Crab : a new *Xiphosurid* from Late Ordovician Koservet-Lagersträtten deposits, Manitoba, Canada, ds *Palaeontology*, 51, 1, 2008, pp. 1–9.

En ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1475-4983.2007.00746.x>

Voir aussi Géoblog, Euchélicères du biote de Fezouata, révélation de l'histoire évolutive précoce du groupe, Thèse en sciences de la Terre, soutenue le 17 février 2022 par Lorenzo Lustrì, ds Géoblog (blog scientifique vulgarisé de la Faculté des géosciences et de l'environnement de Lausanne), 20 février 2023.

En ligne : <https://wp.unil.ch/geoblog/2023/02/eucheliceres-du-biote-de-fezouata-revelation-de-lhistoire-evolutive-precoce-du-groupe/>

³ J.-E. Desvages, La limule : un animal vieux de 450 millions d'années menacé d'extinction, ds *Sciences et Avenir* en ligne, 15.06.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/animaux/animaux-marins/la-limule-un-animal-vieux-de-450-millions-d-annees-menace-d-extinction_103167

⁴ Sur le sujet, voir P. S. Andreev, I. J. Sansom, Q. Li, W. Zhao, J. Wang, C.-C. Wang, L. Peng, L. Jia, T. Qiao, M. Zhu, The oldest gnathostome teeth, ds *Nature*, 609, pp. 964–968 (2022)

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05166-2>

⁵ P. S. Andreev, I. J. Sansom, Q. Li, W. Zhao, J. Wang, C.-C. Wang, L. Peng, L. Jia, T. Qiao, M. Zhu, The oldest gnathostome teeth, ds *Nature*, 609, pp. 964–968 (2022)

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05166-2>

Y-a. Zhu, Q. Li, J. Lu, Y. Chen, J. Wang, Z. Gai, W. Zhao, G. Wei, Y. Yu, P. E. Ahlberg, M. Zhu, The oldest complete jawed vertebrates from the early Silurian of China, ds *Nature*, 609, 2022, pp. 954–958

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05136-8>

⁶ P. S. Andreev, I. J. Sansom, Q. Li, W. Zhao, J. Wang, C.-C. Wang, L. Peng, L. Jia, T. Qiao, M. Zhu, Spiny chondrichthyan from the lower Silurian of South China, ds *Nature*, 609, 2022, pp. 969–974.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05166-2>

aussi de mâchoires. Il semble qu'il ait eu des affinités assez étroites avec les requins épineux, ainsi nommés parce que ses représentants avaient des nageoires en forme d'ailerons et de petites épines ventrales pour soutenir ceux-ci. Ils étaient en outre recouverts de plaques osseuses formées d'écailles soudées¹. *Fanjingshania renovata* serait alors un de leurs précurseurs (voire de leurs ancêtres) car les requins épineux véritables ne sont connus qu'à partir du Silurien supérieur, après -427 Ma.

Dix millions d'années auparavant, vers -437 Ma, le site de Waukesha, dans le Wisconsin, a livré le premier fossile de scorpion connu. Cet arthropode présentait encore des caractéristiques des Euryptérides, dont il semble issu, et déjà ceux des Arachnides auxquels appartiennent les scorpions modernes. Comme les limules, les scorpions archaïques, aquatiques, pouvaient certainement s'aventurer sur la terre ferme².

Vers -425 Ma sont apparus dans les lagunes et les lacs les premiers mille-pattes "terrestres". Par là il faut entendre continentaux plutôt que vivant à l'air libre, car le groupe auxquels ils appartenaient (les Kampécarides, aujourd'hui éteint) est considéré comme encore aquatique, et au mieux amphibie³. Il s'agissait donc seulement, en fait, de mille-pattes d'eau douce. Ce n'est qu'une dizaine de millions d'années plus tard, vers -414 Ma, que seraient apparus les premiers mille-pattes à respiration complètement aérienne⁴.

Auparavant, vers -420 Ma, on trouve trace d'araignées archaïques, ne possédant pas encore de filières pour produire de la soie (du genre des Trigonotarbides, également éteint)⁵. Ce seraient donc là les premiers invertébrés à respiration complètement aérienne.

Ces espèces d'arthropodes sont bien documentées dans le Massif Ardenno-Rhénan, sur le site de Gilboa dans l'état de New York, et en Ecosse sur les sites de Kerrera, Ludlow, Cowie et Rhynie (déjà évoqué plus haut pour sa flore).

Compte-rendu en français : B. Louvet, Découverte du plus ancien vertébré à mâchoires connu, ds SciencePost, 3 octobre 2022.

En ligne : <https://sciencepost.fr/decouverte-du-plus-ancien-vertebre-a-machoi-res-connu/>

¹ *Fanjingshania renovata* présenterait en particulier des similitudes avec l'un d'entre eux, *Climatius reticulatus*, mais le genre *Climatius* ne date que du Dévonien inférieur (après -420 Ma).

Sur les ressemblances avec *Climatius reticulatus*, P. S. Andreev, I. J. Sansom, Q. Li, W. Zhao, J. Wang, C.-C. Wang, L. Peng, L. Jia, T. Qiao, M. Zhu, Spiny chondrichthyan from the lower Silurian of South China, p. 971.

² A. J. Wendruff, L. E. Babcock, C. S. Wirkner, J. Kluessendorf, D. J. Mikulic, A Silurian ancestral scorpion with fossilised internal anatomy illustrating a pathway to arachnid terrestrialisation, ds Scientific Reports, 10, 2020, article n° 14.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-019-56010-z>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Ce scorpion fossile est le plus ancien jamais découvert, Sciences et Avenir en ligne, 16.01.2020.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/archeologie/ce-scorpion-fossile-est-le-plus-ancien-jamais-decouvert_140537

³ J. E. Almond, The Silurian-Devonian fossil record of the Myriapoda, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B, 309, 1985. pp. 227–237.

⁴ Sur quelques problèmes de datation des Myriapodes, en particulier en rapport avec "l'horloge moléculaire" voir notamment M. E. Brookfield, E. J. Catlos, S. E. Suarez, Myriapod divergence times differ between molecular clock and fossil evidence, U/Pb zircon ages of the earliest fossil millipede-bearing sediments and their significance, ds Historical Biology, 32, mai 2020.

En ligne : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08912963.2020.1762593?journalCode=ghbi20>

⁵ UCMP Berkeley, University of California, Muséum of Paleontology, Trigonotarbida and their Allies, anonyme, sans date.

En ligne : <https://ucmp.berkeley.edu/arthropoda/arachnida/trigonotarbida.html>

M. J. Poschmann, W. Mette, C. Rollinger, B. Thuy, New records of Lower Devonian terrestrial arachnids (Arachnida: Phalangiotarbia, Trigonotarbida) from the Ardenno-Rhenish Mountains (West-Eifel/Germany and Luxembourg), ds Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, 306, 1, 2022, pp. 1-11.

En ligne : https://www.schweizerbart.de/content/papers_preview/download/102239

Vers 407 Ma enfin apparaît une faune d'arthropodes terrestres plus diversifiée. Et quelque 20 Ma d'années plus tard, vers -385 Ma, pendant le Givétien (Dévonien moyen) on rencontre des communautés forestières complexes de ces arthropodes.

1.2.2.3. Les premiers vertébrés à respiration aérienne.

Mais il faut attendre encore 25 Ma d'années et le début du Carbonifère, vers -360 Ma, pour voir les premiers animaux vertébrés se risquer timidement hors de l'eau, au bord de lacs ou de lagunes encombrés de végétaux et de branches.

C'est probablement un poisson tétrapode qui ressemblait vaguement à un triton qui a franchi l'étape : l'*Acanthostega*, qui avait huit doigts à la place des nageoires¹. Il semble en effet qu'il pouvait respirer hors de l'eau quoiqu'il possédât encore des branchies fonctionnelles, et peut-être ramper dans la vase pour passer d'une mare à l'autre². Mais ses pattes courtaudes et peu mobiles étaient certainement bien plus adaptées à la nage qu'à la marche³. On peut en dire autant d'*Ichthyostega* découvert en même temps qu'*Acanthostega* (et plus tôt étudié) dont on a souligné depuis longtemps que la raideur de ses pattes n'était vraiment pas adaptée à la marche ni même à la reptation : selon certains il lui aurait même été impossible de se déplacer sur la terre ferme⁴. Il reste que la malformation que devait constituer au départ le remplacement des rayons des nageoires par des doigts nombreux (*Ichthyostega* en avait sept aux membres postérieurs, on ne connaît pas ses membres antérieurs) n'a pas disqualifié les spécimens qui en étaient atteints - et même que celle-ci s'est imposée pour donner de nouvelles espèces. Cela devait donc fournir un avantage dans certains milieux aquatiques en permettant de ramper sur le fond mais aussi de s'agripper à des objets ou des rochers, voire éventuellement de se hisser hors de l'eau et de s'y déplacer maladroitement... En tout cas la porte était ouverte aux Batraciens (ou Amphibiens) qui allaient devenir le groupe dominant parmi les animaux terrestres pendant le Carbonifère qui débute vers -360 Ma (au moment d'*Acanthostega* et d' *Ichthyostega*) et se termine vers -300 Ma.

Vers -340 Ma, en plein Carbonifère donc, allaient cependant apparaître les tout-premiers reptiles, de la famille des Anapsides ou Anapsidés (disparue dans sa quasi-totalité lors de la grande extinction de la fin du Permien vers -250 Ma) - et ces reptiles prendraient ensuite le relais au titre d'animaux dominants.

¹ Sur *Acanthostega* voir par exemple L. Cavin, La sortie des eaux, ds Futura Science, Dossier Darwin et les fossiles, histoire d'une réconciliation, avril 2009 (septembre 2015).

En ligne : <https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/biologie-darwin-fossiles-histoire-reconciliation-864/page/4/>

² De nos jours certaines blennies ont conservé la faculté de pouvoir respirer hors de l'eau lorsqu'elles se font surprendre par la marée basse. C'est notamment le cas de la blennie pholis (*Blennius pholis* ou *Lipophrys pholis*, mordocet) et de la blennie gattorugine (*Parablennius gattorugine*, cabot ou baveuse).

Sur cette dernière voir par exemple R. D. D'Ami, Les animaux de la plage et du littoral, Paris, Hachette (coll. La vie privée des animaux), 1969, pp. 14-15.

Sur la blennie pholis, voir DORIS (Données d'Observations pour la Reconnaissance et l'Identification de la faune et la flore Subaquatiques), Mordocet, *Lipophrys pholis*, N° 2695.

En ligne : <https://doris.ffessm.fr/Especes/Lipophrys-pholis-Mordocet-2695>

³ G. Ciavatti, N. Ciavatti, *Ichthyostega* et ses frères, ds Evolution Biologique, sans date.

En ligne :

<http://www.evolution-biologique.org/histoire-de-la-vie/conquete-des-continentes/la-locomotion/ichthyostega-et-ses-freres.html>

⁴ Voir SagaScience, *Ichthyostega*, Laboratoire de paléontologie, Muséum national d'histoire naturelle de Paris/CNRS, sans date.

En ligne : <https://www.cnrs.fr/cw//dossiers/dosevol/imgArt/dioram/PaleozoDevon/Zimg/ichthyostega.html>

1.2.3. D'autres règnes et leurs interactions étroites : de nécessaires redéfinitions.

Mais tout ce qui se nourrit de matière organique - d'autres cellules "vivantes" (même si heureusement elles sont le plus souvent mortes au moment de l'absorption) - n'est pas forcément animal...

1.2.3.1. Les mycètes.

Couramment appelés champignons, les mycètes¹, qui sont dépourvus de chlorophylle et par là même incapables de photosynthèse, se nourrissent également de matière organique.

Ils constituent de la sorte un véritable troisième règne, en sus du règne végétal et du règne animal - mais on pourrait également considérer le règne des bactéries, celui des amibes ou celui des virus.

Attardons-nous un peu sur celui des mycètes. Même s'il est majoritairement composé de microbes², grâce aux Macromycètes qui forment des carpophores visibles à l'œil nu (et que l'on pourrait à ce titre qualifier de champignons vrais) c'est en effet celui qui nous est le plus facilement accessible.

Il n'y a pas si longtemps, les plus anciens restes de mycètes connus remontaient à -440 Ma³. Mais les découvertes de Rhynie (Ecosse), évoquées un peu plus haut et datées de -410 Ma, suggéraient leur présence bien avant cette époque. Aujourd'hui (et ce n'est peut-être pas fini) on peut effectivement faire remonter celle-ci jusqu'à -890 Ma voire -1 Ma (un milliard d'années) dans des schistes argileux du nord du Canada⁴. Auparavant on avait déjà relevé des traces probantes au Congo, entre -810 et -715 Ma⁵. C'est dire que les mycètes étaient là bien avant les

¹ Ainsi qu'on l'a vu plus haut, le terme de champignon désigne une fructification aérienne visible (un carpophore, ou un sporophore comme on a tendance à dire maintenant) et ne concerne donc qu'une toute petite partie des mycètes.

² Par microbe, il faut entendre de taille microscopique - et non, comme on le fait couramment et abusivement, micro-organisme pathogène (c'est-à-dire vecteur potentiel de maladie).

Tous les mycètes qui ne forment pas de carpophore visible à l'œil nu (Macromycètes) sont appelés Micromycètes. Regroupant aussi bien les levures et les moisissures que des dizaines de milliers d'autres espèces microscopiques, ce sont de loin les plus nombreux : Les Macromycètes, encore parfois appelés champignons supérieurs, quand on devrait dire mycètes supérieurs, représentent sans doute en effet moins de 10 % de l'ensemble - sans doute car on ne sait pas combien il y a de mycètes, on en découvre toujours des milliers voire des dizaines de milliers chaque année...

³ M. R. Smith, Cord-forming Palaeozoic fungi in terrestrial assemblages, ds *Botanical Journal of the Linnean Society*, 180, 4, avril 2016, pp. 452-460.

En ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/boj.12389>

Celui-ci a été baptisé *Tortotubus protuberans*.

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Le plus ancien fossile terrestre, ds *Sciences et avenir en ligne*, 09.03.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/le-plus-ancien-fossile-terrestre_104242

⁴ C. C. Loron, C. François, R. H. Rainbird, E. C. Turner, S. Borensztajn, E. J. Javaux, Early fungi from the Proterozoic era in Arctic Canada, ds *Nature*, 570, juillet 2019, pp. 232-235.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1217-0>

Il s'agit de l'espèce baptisée *Ourasphaira giraldae*.

Compte-rendu en français : B. Louvet, Les plus anciens champignons de la terre sont vieux d'un milliard d'années, ds *Science Post*, mai 2019.

En ligne : <https://sciencepost.fr/les-plus-anciens-champignons-de-la-terre-sont-vieux-dun-milliard-dannees/>

⁵ S. Bonneville, F. Delpomdor, A. Prétat, C. Chevalier, T. Araki, M. Kazemian, A. Steele, A. Schreiber, R. Wirth, L. G. Benning, Molecular identification of fungi microfossils in a Neoproterozoic shale rock, ds *Science Advances*, 6, 4, janvier 2020 (11 pages).

En ligne : <https://advances.sciencemag.org/content/6/4/eaax7599/tab-pdf>

Compte-rendu en français : L. Loumé, Les champignons sont apparus sur Terre 300 millions d'années plus tôt que prévu, ds *Sciences et avenir en ligne*, 23.01.2020.

animaux et les végétaux - et déjà prêts à saisir, comme les bactéries, encore plus anciennes, toute opportunité d'association.

Pendant le Dévonien, entre -420 et -360 Ma environ, une espèce, *Prototaxites*, aurait atteint jusqu'à 8 mètres de haut¹. Sa structure interne fossilisée, en tubes, rappelle celle des polypores vivant sur le tronc des arbres (comme l'amadou, *Fomes fomentarius*). Mais il subsiste un doute sur *Prototaxites*². Car il contenait aussi des polymères que l'on retrouve dans les algues de cette époque. Et cette association de caractères algues-mycètes n'a bien sûr pas manqué d'évoquer... un lichen géant³ ! Ce qui, après tout, n'aurait rien de plus extraordinaire qu'un champignon géant. La photosynthèse de l'algue, combinée au caractère hétérotrophe⁴ du champignon, aurait fourni à l'ensemble un complément de ressources qui lui aurait permis, entre autres, d'atteindre cette taille.

La résistance des mycètes est exceptionnelle. Des prélèvements effectués dans la très haute atmosphère ont révélé la présence de spores à 40 ou 45 km d'altitude, et même jusqu'à 60 km⁵, ce qui tend à prouver qu'elles peuvent survivre à la traversée de la couche d'ozone, et résister au vent solaire aussi bien qu'aux écarts de températures extrêmes.

En fait les mycètes sont partout⁶. On peut les rencontrer dans la mer, où ils comptent sans doute autant d'espèces que sur la terre ferme. On peut en trouver jusque dans les grandes profondeurs océaniques (sous forme parfois de parasites de poissons, de foraminifères ou même d'amibes)⁷ aussi bien que dans les grandes profondeurs terrestres (jusqu'à -2500 et même -3500 m)⁸. Certains s'accommodent des fumerolles des volcans⁹. D'autres s'accrochent aux extrémités des stalactites, où les hyphes (les filaments de leur mycélium) prennent part à la croissance des cristaux de calcite¹⁰.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/les-champignons-sont-plus-vieux-que-nous-ne-le-pensions_140727

¹ K. C. Boyce, C. L. Hotton, M. L. Fogel, G. D. Cody, R. M. Hazen, A. H. Knoll, F. M. Hueber, Devonian Landscape Heterogeneity Recorded by a Giant Fungus, *ds Geology*, 35, 5, 2007, pp. 399-402.

En ligne :

https://www.researchgate.net/profile/Robert_Hazen/publication/38413561_Devonian_Landscape_Heterogeneity_Recorded_by_a_Giant_Fungus/links/0f317536b6d0f39e0c000000/Devonian-Landscape-Heterogeneity-Recorded-by-a-Giant-Fungus.pdf

² Sur ce doute voir par exemple M. Sheldrake, *Le monde caché*, Paris, Editions First/Pocket, 2021, n. 4 pp. 16-17.

³ M. A. Selosse, Prototaxites, A 400 Myr Old Giant Fossil, A Saprophytic Holobasidiomycete, or A Lichen ? *ds Mycological Research*, 106, 6, juin 2002, pp. 642-644.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/231847459_Prototaxites_A_400_MYR_Old_Giant_Fossil_A_Saprophytic_Holobasidiomycete_or_A_Lichen

⁴ Qui se nourrit de matière organique (voir plus haut).

⁵ M. Locquin, *Mycologie générale et structurale*, Paris, Masson, 1984, p. 243.

⁶ Sur ce thème, et leurs rôles, voir par exemple K. Peay, P. Kennedy, J. Talbot, Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome, *ds Nature Reviews Microbiology*, 14, 2016, pp. 434-447.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/nrmicro.2016.59>

⁷ M. Locquin, *Mycologie générale et structurale*, pp. 242, 243, 244, 248.

Plus récemment D. Bass, A. Howe, N. Brown, H. Barton, M. Demidova, H. Michelle, L. Li, H. Sanders, S. C. Watkinson, S. Willcock, T. A. Richards, Yeast forms dominate fungal diversity in the deep oceans, *ds Proceedings of the Royal Society, B, Biological Sciences*, 274, 1629, 22 décembre 2007, pp. 3069-3077.

En ligne : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2293941/>

pdf : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2293941/pdf/rsrb20071067.pdf>

⁸ M. Locquin, *op. cit.*, pp. 242 et 243.

⁹ M. Locquin, *op. cit.*, p. 246.

¹⁰ M. Locquin, *op. cit.*, p. 244.

En 2007, on a découvert qu'un mycète, *Cryptococcus neoformans*, de la grande famille des levures, survivait contre le "sarcophage" du réacteur de Tchernobyl et semblait même tirer profit de la radioactivité pour se développer¹...

Cette capacité de survivre dans des milieux hostiles - et d'y proliférer - a permis d'utiliser les mycètes comme agents dépolluants, notamment *Pleurotus ostreatus* (le pleurote en forme d'huître que l'on trouve fréquemment dans les rayons des magasins) utilisé pour décomposer (en les assimilant) les hydrocarbures². Le procédé est un peu plus long que les procédés chimiques utilisés couramment, mais à la différence de ceux-ci qui il laisse un sol vierge de produits chimiques (eux-mêmes potentiellement polluants)³.

Souvent nécrophages (ils absorbent les végétaux morts qu'ils décomposent) les mycètes peuvent être également prédateurs de végétaux vivants, voire de formes de vie minuscules telles qu'amibes ou nématodes (vers). Pour capturer ces derniers, ils ont été capables, selon les espèces, de mettre au point des stratégies diverses. Certains les empoisonnent avant de les dissoudre⁴, d'autres réagissent à la chaleur (toute relative) que leurs proies émettent pour se jeter sur elles⁵. D'une manière plus diffuse, ils peuvent également parasiter et envahir des animaux plus gros, y compris des mammifères, et dans certains cas provoquer leur mort⁶. Seules leurs vieilles concurrentes, mais aussi souvent alliées⁷, les bactéries (qui devraient également

¹ E. Dadachova, R. A. Bryan, H. Xianchun, T. Moadel, A. D. Schweitzer, P. Aisen, J. D. Nosanchuk, A. Casadevall, Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi, ds PLoS ONE (Public Library of Science), 2, 5, mai 2007, article 457.

En ligne : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0000457>

² Il paraît que le champignon reste comestible... Ceux qui sont proposés à la vente proviennent de cultures sur paille et sciure seulement.

³ Sur ce thème on peut voir le documentaire passionnant d'A. Rizzo, T. Sipp, Les champignons pourront-ils sauver le monde ? Arte France/Les films d'ici/CNRS Images, 2013 (52 mn), notamment à 7mn et s. (spécialement de 9mn36 à 15mn10 et 15mn45 pour *Pleurotus*).

On peut voir également S. Thomas, P. Becker, M. R. Pinza, J. Q. Word, Mycoremediation of aged petroleum hydrocarbon conatminants in soils, Washington State Department of Transportation, Pacific northwest national laboratory (Battelle Memorial Institute), novembre 1998.

En ligne : <http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/464.1.pdf>

Pour un texte en Français : A. Fayeulle, Etudes des mécanismes intervenant dans la biodégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques par les champignons saprotrophes telluriques en vue d'applications en bioremédiation fongique de sols pollués, Thèse (Sciences de la matière), Université du Littoral-Côte-d'Opale / TUM (HelmHoltz Zentrum München), 12 décembre 2013.

En ligne : <https://www.theses.fr/2013DUNK0351.pdf>

⁴ C'est le cas de *Pleurotus ostreatus* encore, dont les hyphes comportent à leur extrémité une micro-goutte d'une substance assez toxique pour paralyser le nématode le temps que l'hyphes pénètre par sa bouche et le digère de l'intérieur : voir M. Sheldrake, Le monde caché, p. 89.

⁵ M. Locquin, Mycologie générale et structurale, p. 267.

Arthrobotrys, par exemple, attrape les petits vers nématodes avec un anneau constricteur composé de trois cellules qui se gonflent très rapidement et étrangle la proie... Source : e-phytia (INRAE), HYPP, encyclopédie en protection des plantes, Parasitoïdes, hyperparasites, faunes et flore auxiliaire, Les champignons et assimilés symbiotiques, parasites ou antagonistes.

En ligne : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/11111/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Les-champignons-et-assimiles-symbiotiques-parasites-ou-antagonistes>

⁶ Notamment *Cryptococcus neoformans* déjà cité pour sa résistance aux radiations (et même sa faculté de les utiliser) dont l'invasion provoque la cryptococcose, une maladie potentiellement mortelle.

C'est cependant un cas très particulier. Dans l'ensemble, ils ne sont pas très dangereux. Notre corps en abrite des centaines de variétés microscopiques qui vivent en symbiose avec lui et l'aident à fonctionner correctement, en particulier des levures.

⁷ Des bactéries sont actives dans les symbioses entre certains mycètes et végétaux, où elles jouent le rôle d'auxiliaires de mycorhization : on les désigne à ce titre sous l'acronyme de B.A.M., bactéries auxiliaires de mycorhization, et on peut envisager alors un véritable partenariat à trois. Sur le sujet : J. M. Ricard, avec F. Bergougnoux, G. Callot, G. Chevalier, J.-M. Olivier, J.-C. Pargney, P. Sourzat, La truffe, Guide technique de la trufficulture, Paris, Editions du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, (C.T.I.F.L.), 2003, p. 104.

constituer un règne à part - et quel règne, puisqu'elles sont partout !) pourraient sans doute leur être comparées en termes d'adaptabilité, de résistance et d'opportunisme¹.

Pour les mycètes, l'une des expressions les plus courantes de cet opportunisme reste la symbiose mycorhizienne déjà évoquée plus haut dans ces pages². Comme on l'a vu, il s'agit de l'association plus ou moins étroite (endomycorhizienne ou ectomycorhizienne)³ entre les hyphes (formant le mycélium) du champignon et les racines d'une plante. On se souvient qu'à l'origine les racines se sont très probablement formées pour profiter au mieux d'une association pré-mycorhizienne - ou plutôt pré-"rhizienne". Celle-ci aurait été conclue avec les premiers végétaux aériens dépourvus de racines (des mousses, ou mieux encore des hépatiques appartenant au groupe des Bryophytes) peu après la sortie de la mer qui se serait produite vers -475 Ma, pendant l'Ordovicien inférieur. Mais en amont de ces Bryophytes, et ouvrant la voie à cette association, on a vu que des algues avaient déjà profité des avantages (en termes d'accroissement des ressources) d'une alliance avec des mycètes (des Gloméracées)⁴. On pourrait alors considérer que le développement des Bryophytes (mousses, hépatiques) provient de la symbiose pré-rhizienne d'une algue avec un mycète. On ne connaît pas toutefois d'espèce bryophyte marine. L'évolution se serait donc passée sur la terre ferme. Pour ces végétaux en tout cas les racines n'étaient pas plus indispensables que pour les algues : un Gloméromycète augmentait les capacités de collecte de l'algue ou du Bryophyte, et cela suffisait à fournir au végétal toutes les ressources dont il avait besoin (en échange des sucres que ce dernier lui procurait).

Par ailleurs il ne faut pas oublier que 3 à 4 % des lichens combinent une association algue-mycète-cyanobactérie : F. Högnabba, S. Stenroos, A. Thell, L. Myllys, Evolution of cyanobacterial symbioses in Ascomycota, ds A. Aptroot, M. R. D Seaward, L. B Sparrius (dir.), Biodiversity and Ecology of Lichens Liber Amicorum Harrie Sipman, Bibliotheca Lichenologica, 99, Berlin, Cramer, 2009, pp. 163-184.

En ligne : <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/evolution-of-cyanobacterial-symbioses-in-ascomycota>

¹ On en aurait retrouvé vivantes après trois ans passés sur la Lune : J.-M. Pelt, La raison du plus faible, Paris, Fayard, 2009, p. 35.

Il faut également compter avec les virus (dont certains, les phages, ont été utilisés avec succès contre des bactéries résistantes aux antibiotiques). Sur ces derniers, voir notamment Hospices civils de Lyon, "Infections gravissimes : à Lyon, le 1er traitement par phages fabriqué en France" ds CHU Réseau, L'actu des CHU, 19 septembre 2017.

En ligne : <https://www.reseau-chu.org/article/a-lyon-le-1er-traitement-par-phages-fabrique-en-france/>
Egalement Sciences et Avenir avec AFP, Les virus phages, une alternative aux antibiotiques à nouveau considérée, ds Sciences et Avenir en ligne, 20.03.2019.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/sante/les-virus-phages-une-alternative-aux-antibiotiques_132284

² 1.2.1.1. Les mécanismes de symbiose.

³ Association Endomycorhizienne pénétrant à l'intérieur même des cellules des plantes partenaires, association ectomycorhizienne pénétrant entre ces cellules (et demeurant donc plus superficielle).

⁴ En ce sens : M. K. Rich, N. Vigneron, C. Libourel, J. Keller, X. Li, M. Hajheidhari, G. V. Radhakrishnan, A. Le Ru, I. S. Diop, G. Potente, E. Conti, D. Duijsings, A. Batut, P. Le Faouder, K. Kodama, J. Kyojuka, E. Sallet, G. Bécard, M. Rodriguez-Franco, T. Ott, J. Bertrand-Michel, G. E. D. Oldroyd, P. Szövényi, M. Bucher, P.-M. Delaux. Lipid exchanges drove the evolution of mutualism during plant terrestrialization, ds Science, 372, 6544, mai 2021, pp.864-868 : « *Here we identified a conserved transcriptomic response to AMF among land plants* » - « *nous avons identifié une réponse transcriptomique conservée* [concernant l'ensemble des ARN messagers produits lors du processus de transcription d'un génome] *à un champignon mycorhizien à arbuscules en amont des plantes terrestres* [aériennes] »

En ligne : <https://hal.science/hal-03233313/document>

Egalement CNRS, Université de Toulouse III Paul Sabatier, INRAE, communiqué de presse national, Paris, 20 mai 2021, Un partenariat plantes-champignons à l'origine de la végétalisation terrestre : « *L'ancêtre commun de ces deux groupes de végétaux* [plantes vasculaires et bryophytes], *qui a colonisé la terre ferme, devait donc échanger des lipides avec le champignon* ».

En ligne : https://www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2021-05/CP%20VF%20Web.pdf

Les racines (apparues vers -390/-385 Ma)¹ auraient donc été une sorte de luxe. Mais en apportant un surplus de ressources, elles ont permis d'aller plus loin, d'acquérir la synthèse de la lignine pour former les tiges des plantes vasculaires.

Pour celles-ci également l'intérêt de l'association mycorhizienne est immense. Les mycètes sont capables de décomposer le sol et même la roche pour en extraire les éléments indispensables à la plante (en particulier l'azote et le phosphore). En outre ces ressources restent disponibles dans tout le réseau des hyphes où elles sont stockées sous forme de petites vésicules. Mais ce n'est pas tout. Les mycètes récupèrent encore l'eau, dont se gorgent leurs hyphes... et leur partenaire végétal. Car ces hyphes sont minuscules : à longueur égale, ils représentent 100 fois moins de biomasse que les racines. Ils sont donc beaucoup plus agiles et s'étendent beaucoup plus rapidement que les racines. De fait, chaque centimètre cube de sol contient 100 à 1000 mètres d'hyphes. Et un mètre carré de prairie, terrain propice aux mycètes endomycorhiziens, en contient... 10 kilomètres² ! On comprend le profit que les végétaux tirent de l'association avec un partenaire aussi performant ! Mais ce n'est pas gratuit... En échange, le mycète consomme 10 à 40 % du produit de la photosynthèse réalisée par la plante : 10 % environ pour les espèces endomycorhiziennes (Gloméracées) et de 20 à 40 % pour les espèces ectomycorhiziennes (telles que la truffe, la girolle ou le cèpe pour les plus connues)³.

Les mycètes endomycorhiziens tirent donc moins sur la plante, et c'est peut-être (avec leur très grande ancienneté, qui leur aurait donné le temps de toucher un plus grand nombre d'espèces)⁴ une des clés de leur succès : bien qu'ils ne comptent que 150 ou 200 espèces, ils peuvent s'associer à 70 ou 80 % des plantes connues⁵ - surtout des plantes à durée de vie faible, ou moyenne. Les espèces endomycorhiziennes sont donc naturellement les alliées des agriculteurs désireux de se passer de pesticides (qui les tuent, comme ils tuent à petit feu les consommateurs) tout en économisant de l'engrais... et de l'arrosage !

Sous nos latitudes toutefois, les grands arbres, feuillus comme résineux, sont plus réceptifs aux espèces ectomycorhiziennes. Ces dernières regroupent des milliers d'espèces (notamment 80 % environ des champignons vrais, à fructification aérienne visible)⁶, mais elles ne s'associent qu'à

¹ M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 261.

W. E. Stein, C. M. Berry, J. L. Morris, L. Van Aller Hernick, F. Mannolini, C. Ver Straeten, E. Landing, J. E. A. Marxhall, C. H. Wellman, D. J. Beerling, J. R. Leake, Mid-Devonian *Archaeopteris* Roots Signal Revolutionary Change in Earliest Fossil Forests, ds Current Biology, 30, 3, février 2020, pp. 421-431.

En ligne :

[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(19\)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsho%3Dtrue](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(19)31569-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982219315696%3Fsho%3Dtrue)

² M. A. Selosse, Jamais seul, p. 38.

³ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 36.

⁴ Ils étaient déjà là au moment de la flore de Rhynie, au Dévonien inférieur, vers -410 Ma (symbiose pré-mycorhizienne).

La symbiose ectomycorhizienne pour sa part ne se serait mise en place qu'au moment de l'apparition des pins, vers -140 Ma (M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 324).

⁵ Selon M. A. Selosse, 71 % (L'origine du monde, p. 320-321) voire 80 % (Jamais seul, pp. 33, 84).

Rappelons qu'il est très difficile d'estimer le nombre total d'espèces de végétaux dont on ne connaît sans doute pas la moitié, et encore plus celui des mycètes où le nombre total d'espèces pourrait être 10 à 20 fois plus élevé que le nombre d'espèces connues (entre 70.000 et 150.000). Source : Wikipédia, Nouvelle espèce biologique.

En ligne : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nouvelle_esp%C3%A8ce_biologique

Sur une estimation, bien supérieure et très incertaine, du nombre réel d'espèces, voir M. Blackwell, The Fungi, 1, 2, 3 ... 5.1 million species ? ds American Journal of Botany 98, 3, mars 2011, pp. 426-438.

En ligne : <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3732/ajb.1000298>

En 2011 on connaissait 70.000 espèces de mycètes, nombre qui serait passé à 100.000 en 2015.

⁶ Les mycètes dits supérieurs (appelés aussi Macromycètes, ceux qui forment des carpophores visibles ou champignons).

5 à 10 % des plantes environ¹. Elles en sont parfois extrêmement dépendantes : nombre d'espèces ectomycorhiziennes peuvent survivre mais ne peuvent pas fructifier, ni de la sorte se reproduire, sans les arbres auxquelles elles sont associées². En contrepartie, elles aident l'arbre, notamment en cas de stress hydrique - ce qui se révèle capital aujourd'hui, dans une Europe en proie à une sécheresse croissante depuis 1976. Le discret *Cenococcum geophilum* par exemple, un des mycètes ectomycorhiziens les plus fréquemment associés aux racines des arbres des forêts tempérées, permet ainsi aux racines superficielles du hêtre de mieux résister aux épisodes secs³. Si les espèces endomycorhiziennes sont de préférence retenues pour le projet de Grande Muraille Verte au Sahel⁴, en Europe certaines espèces ectomycorhiziennes pourraient donc grandement aider les forêts à résister à la sécheresse - et par là même contribuer à limiter conséquemment celle-ci (car les forêts restent l'un des principaux moyens de contrer la désertification déjà observée dans certaines régions d'Europe de l'Est, en Olténie par exemple)⁵. Au demeurant, sous nos latitudes, l'un n'exclut pas l'autre - puisque les grands arbres peuvent très bien entretenir une association endomycorhizienne⁶ quand ils sont jeunes et passer par la suite à une association ectomycorhizienne⁷...

Seules 10 à 15 % des plantes sont réfractaires aux associations mycorhiziennes. Elles n'en ont pas besoin parce qu'elles poussent en général sur des sols riches et humiques contenant déjà des sels minéraux dissous que les minuscules poils de leurs racines peuvent absorber. C'est notamment le cas de l'arabette (*Arabidopsis thaliana*)⁸ qu'il ne faut pas confondre avec son homophone provençal, la rabette (*Campanula rapunculus*) - une plante jadis cultivée, aujourd'hui salade sauvage gourmande (rosette et racine) pour qui sait la reconnaître... et la cueillir avec modération, sans la faire disparaître. Le cas de la première (*Arabidopsis thaliana*) est particulièrement intéressant : comme c'est une plante qui a été étudiée très tôt, on a cru, et pendant longtemps, que la majorité des plantes se passaient comme elle d'associations mycorhiziennes - alors que c'est tout le contraire !

¹ Et même seulement 2 % pour M. A. Selosse, L'origine du monde, p. 323.

² M. A. Selosse, Jamais seul, p. 36.

³ J.-L. Jany, Le champignon ectomycorhizien *Cenococcum geophilum* Fr. dans les hêtraies lorraines : structure génétique des populations et rôle dans la résistance à la sécheresse des racines superficielles du hêtre. Biologie végétale. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2002.

En ligne : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754415/document>

Malheureusement ces informations - de même que celle de la résistance du hêtre dans le Midi, sur la montagne de Lure par exemple, soit par association mycorhizienne soit par adaptation pluri-générationnelle aux conditions naturelles de sécheresse estivale - transmises à une ingénieure de l'Office de l'environnement suisse qui se disait préoccupée de la disparition possible du hêtre dans le Jura, n'ont semble-t-il suscité aucun intérêt réel... comme c'est encore trop souvent le cas pour les associations mycorhiziennes.

⁴ A. Dia, R. Duponnois (dir.), La Grande Muraille Verte, Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux, Marseille, IRD Editions, 2012.

En ligne : <https://books.openedition.org/irdeditions/3247>

⁵ Sur le sujet on peut voir lorsque c'est possible l'excellent documentaire de J. Niehuss, M. Martschoke, Sécheresse en Europe, Catastrophe en vue, Production TVNTV & ZDF/ARTE, 2021 (54 minutes).

⁶ Surtout, lorsque l'on veut provoquer ou favoriser l'endomycorhization, si l'on apporte un soutien en phosphore sous forme de phosphates - en n'oubliant pas que tous les phosphates ne se valent pas pour cette opération (selon l'arbre et le mycète endomycorhizien) : pour le jujubier dans le Sahel par exemple, voir A. Bâ, T. Guissou, R. Duponnois, C. Plenchette, O. Sacko, D. Sidibé, K. Sylla, B. Windou, Mycorhization contrôlée et fertilisation phosphatée, applications à la domestication du jujubier, ds Fruits (Cirad/EDP Sciences), 56, 2001, p. 261-269, spécialement Tableau II p. 265 et Tableau III p. 266.

En ligne : <https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/article/view/35745/34523>

⁷ Sur ce passage de l'endomycorhization à l'ectomycorhization, voir par exemple N. Leroux, Mycorhizes, Les ectomycorhizes pour les feuillus, les résineux et les plantes vivaces, ds Permaforêt, 31 janvier 2014.

En ligne : <https://permaforet.blogspot.com/2014/01/mycorhizes-les-ectomycorhizes-pour-les.html>

⁸ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 37.

Une plante peut s'associer à différents mycètes, et dans l'ensemble un mycète peut s'associer à différentes plantes¹ tout en tolérant d'autres mycètes. Mais les hyphes des mycètes leur confèrent encore ici un avantage : un seul individu peut couvrir des surfaces énormes. On a pu prouver, en les analysant génétiquement, qu'un mycète (une armillaire proche de notre armillaire couleur de miel) couvre en Amérique du Nord 965 ha (9,65 km²) et serait installé là depuis... 1900 à 8650 ans² !

Les mycètes établissent ainsi des ponts entre les différentes plantes susceptibles de s'associer à eux (parfois comme on vient de le voir sur de très vastes superficies pour un seul individu). Mais ils peuvent en outre prendre le relai l'un de l'autre. Lorsqu'un hyphe rencontre un autre hyphe, toute une série de réactions chimiques s'opèrent dans leurs terminaisons qui aboutissent à définir s'il s'agit d'un individu d'une autre espèce (compatible ou incompatible), d'un individu de leur propre espèce, voire... de lui-même - car le mycète n'a bien sûr aucune conscience de lui-même, ni de ses limites.

Il en va de même lorsqu'un hyphe rencontre une radicelle. La plante n'a pas plus conscience d'elle-même que le mycète³. Mais les réactions chimiques qui s'opèrent dans leurs terminaisons déterminent notamment la présence de sucres d'une part, de sels minéraux et d'eau d'autre part. En fonction de la qualité et de la quantité de produits absorbables, de part et d'autre se mettent en place biochimiquement, automatiquement, les moyens d'en tirer profit au mieux. Il ne faut pas oublier que racines et radicelles sont apparues il y a 395 Ma sous la forme d'un prolongement des symbiose pré-rhiziennes nouées pour profiter au mieux des ressources en nutriments fournies par les mycètes (en l'occurrence probablement des Gloméracées)⁴. L'aptitude à l'échange fait donc partie de leur bagage génétique⁵ - elle en est même le fondement.

Il s'établit ainsi lors du tout premier contact entre un hyphe et une radicelle, quand c'est profitable aux deux parties, un lien que l'on peut qualifier déjà de pré-symbiotique entre le végétal et le mycète. En raison de leur agilité et de leur mobilité bien supérieures, mais aussi de la surface qu'ils sont susceptibles de couvrir, ce sont toutefois en règle générale les mycètes qui sont à l'origine de ces jonctions - et c'est pourquoi l'on peut vraiment dire que ce sont eux qui

¹ On peut citer des exceptions parmi les mycètes "supérieurs" (les Macromycètes) : ainsi le lactaire délicieux (*Lactarius deliciosus*, goûteux, mais pas vraiment délicieux) ne s'associe qu'aux pins (on peut le trouver sous des feuillus mais seulement s'il y a des pins à proximité), alors que ses cousins (dépourvus de goût) le lactaire saumoné (*Lactarius salmonicolor*) et le lactaire détestable (*Lactarius deterrimus*) poussent respectivement sous les sapins et les épicéas - et exclusivement sous ces arbres.

² B. A. Ferguson, T. A. Dreisbach, C. G. Parks, G. M. Filip, C. L. Schmitt, Coarse-scale population structure of pathogenic *Armillaria* species in a mixed-conifer forest in the Blue Mountains of northeast Oregon, ds Canadian Journal of Forest Research, 33, 4, Avril 2003, pp. 612-623.

En ligne (résumé en français) : <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/x03-065>

Il s'agit d'*Armillaria ostoyea* = *Armillaria solidipes* (armillaire d'Ostoya, armillaire obscure).

Pour en savoir plus sur ce champignon, on peut lire en ligne ChampYves, Les Champignons :

https://champyves.pagesperso-orange.fr/champignons/fichier_htm/lames/Armillaria_ostoyae.html

³ Sur l'absence de système nerveux chez la plante, s'il est besoin de le rappeler, L. Tillon, Être un chêne, p. 96.

⁴ Il s'est même créé une zone d'échanges privilégiée autour des racines et des radicelles, la rhizosphère, épaisse de quelques millimètres d'épaisseur, où prolifère toute une population de bactéries et de micro-vers se nourrissant à la fois des cellules mortes des racines qui sont rejetées par la plante, et de l'exsudation de nutriments par les radicelles. Cette zone riche en ressources attire également les hyphes et de nombreuses bactéries (dont certaines favorisent la liaison mycète-plante). Sur le sujet voir par exemple J. M. Ricard, avec F. Bergougnoux, G. Callot, G. Chevalier, J.-M. Olivier, J.-C. Pargney, P. Sourzat, La truffe, Guide technique de la trufficulture, Paris, Editions du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, (C.T.I.F.L.), 2003, p. 99.

⁵ Il peut sembler étrange de paraître dissocier un peu les radicelles de la plante, mais L. Tillon va plus loin en soulignant que pour certaines essences d'arbres (dont le chêne) chaque branche constitue quasiment un organisme distinct quoique relié au tout, l'arbre se présentant alors comme une sorte de colonie : L. Tillon, Être un chêne, Sous l'écorce de Quercus, Arles, Actes Sud, 2021, pp. 75-76, 86, 101-102, 147-148.

établissent les ponts entre les différentes plantes susceptibles de s'associer à eux : non seulement ils assurent ces liaisons, mais aussi ils les initient (même s'ils ne peuvent le faire tout seuls).

Les nutriments circulent librement dans tout le système des hyphes, seulement stockés ici ou là dans de minuscules vésicules. Il s'agit bien sûr des sels minéraux et de l'eau qui intéressent au premier chef les plantes, mais aussi des sucres qu'ils ont absorbés plus loin et pas (encore) utilisés. Les mycètes assurent ainsi le transfert de nutriments d'une plante à l'autre - ce qui peut donner l'impression, pour peu que l'anthropomorphisme s'en mêle (et nous emmêle) que celles-ci, et en particulier les arbres, manifestent une volonté d'entraide. Il n'en est rien, évidemment. Le mycète est bel et bien l'agent d'une entraide entre les végétaux, mais celle-ci n'est "voulue", "décidée" ou "planifiée" ni par l'un ni par les autres. C'est juste que leur organisation naturelle, et leur mode de fonctionnement, les poussent à ces échanges parce qu'ils les ont intégrés très tôt et se sont construits sur eux. Point n'est besoin ici de "volonté" ni de "stratégie" comme on le lit souvent.

Les réactions sont ici du même ordre que celles qui prévalent lors de l'évolution de tout organisme : dès que sont apparues des modifications permettant une symbiose plus efficace, l'évolution adaptative des végétaux et des mycètes les a favorisées de part et d'autre, simplement et automatiquement, parce que ces modifications naturelles dotaient les individus qui les possédaient d'une santé supérieure aux autres - ce qui fait qu'ils se reproduisaient plus et mieux. Pas de calcul là-dedans, c'est une loi de la nature, aussi élémentaire que la gravité. Et dans les échanges mycètes-plantes, pas de calcul non plus : chacun joue un rôle sans en avoir conscience, au mieux de leur intérêt respectif et souvent de l'intérêt des deux partenaires. C'est la nature, leur nature, qui les pousse à échanger - parce que c'est l'attitude la plus favorable pour les deux. Dommage que beaucoup d'hommes, qui prêchent le repli des cultures sur elles-mêmes, souvent au nom du suprémacisme d'une culture que l'on souhaite épargnée par la "pollution" d'autres, aient perdu de vue cette loi. Dommage aussi par ailleurs, obsédés par leur "pureté" culturelle, voire ethnique, qu'ils ne se soucient généralement pas des diverses pollutions bien réelles qui menacent leur environnement... et leur vie même. C'est un bon exemple d'une idée (ici grossière et simpliste mais ce sont pour beaucoup les plus séduisantes parce que les plus faciles)¹ prenant le pas sur une réalité - et prenant même le contrepied de celle-ci, avec tous les dangers que cela représente.

Il peut toutefois bien sûr y avoir parasitisme - surtout de la part du champignon. On emploie alors parfois le terme de "tricherie" mais il est sans doute encore trop anthropomorphiste. En fait, dans tout échange qualifié de "mutualiste" (réciproque et relativement égalitaire)² l'un des partenaires peut prendre plus que l'autre. On a déjà vu plus haut que d'un grand groupe à l'autre (mycètes endomycorhiziens ou ectomycorhiziens) et même entre espèces d'un même groupe il y a des différences sensibles : de 10 % à 40 % des ressources de l'hôte sont consommées par le

¹ Cela me rappelle mon premier sujet de philo, en classe de terminale, il y a... bien longtemps : « *L'homme est encore plus paresseux que lâche, et ce qu'il craint le plus c'est la loyauté et la sincérité absolues* ». Je n'ai jamais trouvé la référence exacte de cette citation attribuée à F. Nietzsche, mais nous avons eu la chance d'avoir, cette année-là, une prof extraordinaire - bien loin (et au-dessus) de certaines médiocrités croisées plus tard.

² Un mycète n'est pas voué à un rôle plutôt qu'à un autre. La truffe par exemple est qualifiée de mutualiste dans ses échanges avec les racines des arbres hôtes, mais de parasite à l'égard des éventuels champignons mycorhiziens à arbuscules qu'elle peut rencontrer. Voir à ce titre E. Taschen, Interactions biotiques et biologie reproductive de la Truffe noire, *Tuber melanosporum* (Vittad.) : des truffières spontanées aux plantations, Thèse, Université de Montpellier 2, 30/06/2015, p. 93.

En ligne : http://isyeb.mnhn.fr/sites/isyeb/files/documents/these_elisa_taschen_2015.pdf

En fait on a souvent l'impression que la truffe affaiblit l'arbre avec lequel elle entretient une symbiose, mais c'est surtout parce qu'elle vient bien avec des conditions de sols qui affaiblissent les arbres, ou les font pousser plus lentement. Dans la montagne de Lure, le pépiniériste-trufficulteur-conférencier J.-L. Bénard m'a montré des noisetiers âgés de près de 30 ans, n'atteignant pas plus de 1,80 mètre de haut du fait des conditions très difficiles (sécheresse, pauvreté des sols très caillouteux) et "portant" des truffes noires depuis 20 ans (ce qui est très long).

mycète¹. Et entre mutualisme et parasitisme trouve encore place le commensalisme : la relation est bénéfique pour le commensal, mais neutre (ni vraiment bénéfique, ni vraiment nuisible) pour l'hôte...

Du point de vue humain, calculateur, l'attitude des deux partenaires lors d'une symbiose mutualiste, et plus encore du mycète lors d'une relation parasite ou commensale, ressemble à une stratégie, ou peut s'interpréter en termes de stratégie - sauf qu'il y manque chez les végétaux comme chez les mycètes la conscience, la volonté, et la projection, qui président à toute stratégie... comme à toute tricherie, d'ailleurs.

On connaît cependant des mycètes capables d'adopter des attitudes diverses en fonction des circonstances - et parfois même, apparemment, sans que les circonstances guident les attitudes². On peut alors être tenté de parler de "décision" ou de "choix" de la part du mycète. C'est probablement encore une illusion liée à notre manque de connaissance fine. M. Sheldrake qui emploie ces termes³ relate par ailleurs qu'un spécialiste américain de la truffe, C. Lefèvre, lors de ses expériences de mycorhization, avait en moyenne un taux de réussite de 30 %. Une année, il en a eu 100 %⁴. Il n'a pas pour autant pensé qu'il y avait eu un choix des spores de germer mieux - mais simplement qu'il devait y avoir eu cette année-là des conditions, des circonstances dans l'expérimentation, qui lui avaient complètement échappées. Et c'était certainement très sage. C'est finalement notre méconnaissance de la nature qui nous fait croire à une pensée là où il n'y a que mécanismes automatiques - et parfois, hasard (bien que l'on nomme surtout hasard ce dont les ressorts échappent à notre compréhension, ou notre perception). Méconnaissance de la nature conjuguée à l'amour bien réel de certains pour celle-ci, en même temps que la croyance en la différence (et la supériorité) de l'humain vis-à-vis de celle-ci. Mais au fond, qu'est-ce que l'humain ?

1.2.3.2. L'humain, un bon exemple de symbioses multiples et de... fin de règne ?

En fait cette méconnaissance de la nature, et les fantasmes qu'elle nourrit, ne s'arrête pas aux végétaux. Elle concerne également l'être humain.

¹ M. A. Selosse, *Jamais seul*, p. 36.

² M. Sheldrake cite ainsi l'exemple de l'*Arthrobotrys oligospora* qui peut se comporter comme un saprophyte (décomposeur de bois) normal lorsque la matière est abondante, et lorsque celle-ci vient à manquer comme un chasseur de nématodes, mais aussi agresser d'autres espèces de mycètes ou pénétrer dans les racines d'une plante pour se nourrir : M. Sheldrake, *Le monde caché*, Paris, Editions First/Pocket, 2021, p. 89.

³ M. Sheldrake, *Le monde caché*, p. 97 (décision) et p. 89 (choix).

⁴ M. Sheldrake, *Le monde caché*, pp. 85-86.

Assez bizarrement, M. Sheldrake semble ignorer les longs travaux de l'INRAE sur la truffe, notamment depuis une vingtaine d'années sur la truffe blanche du Piémont (*Tuber magnatum*) qui ont abouti à une mise en culture réussie, travaux relatés dans un article paru en janvier 2021 : voir C. Bach, P. Beacco, P. Cammaletti, Z. Babel-Chen, E. Levesque, F. Todesco, C. Cotton, B. Robin, C. Murat, First production of Italian white truffle (*Tuber magnatum* Pico) ascocarps in an orchard outside its natural range distribution in France, ds *Mycorrhiza*, 31, 2021, pp. 383-388.

En ligne : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00572-020-01013-2>

En Provence et dans le Luberon, on dit souvent que la trufficulture est née à Saint-Saturnin-lès-Apt, de l'observation de Joseph Talon, un rabassier (ramasseur de truffes) natif du hameau de Croagnes, qui aurait eu l'idée en 1808 de planter des glands pour récolter des truffes.

Avec autre Joseph Talon, son cousin, il serait à l'origine des premières truffières artificielles créées à Buoux et aux Agnels après Saint-Saturnin-lès-Apt. Sur cet épisode voir J.-M. Olivier, J.-C. Savignac, P. Sourzat, *Truffe et trufficulture*, Périgueux, Editions Fanlac, 1996, 2003, p. 20.

Il serait par ailleurs amusant que ces Joseph Talon fussent les descendant lointain de Vuilelm Talun/Talon, époux d'une Poncia issue des fondateurs de la famille de Castellane (possessionnée entre autres à Saignon et Saint-Saturnin au Xe siècle). Sur ce Vuilelm Talon en tout cas, on peut consulter N. Didier, H. Dubled, J. Barruol, *Cartulaire de l'Eglise d'Apt*, charte CXV (115) datée de 1113 pp. 270-272.

On sait en effet que les réactions de l'humain lui-même, ses réflexions, ses calculs, ses stratégies, découlent de réactions électro-chimiques dans son cerveau, au niveau de ses neurones. Mais ils répondent ainsi à des *stimuli* bio-chimiques dont certains nous échappent. Depuis des années, les recherches ont par exemple mis en évidence le lien entre hormones et mémoire. On sait que si le taux d'hormones du stress est trop bas, ou trop élevé, la capacité de mémoriser s'en trouve affectée¹. En 2005, on avait fait état en outre d'une hormone (la prégnénolone) qui aurait dopé la mémoire². A partir de 2012, c'est une autre hormone (IGF-II, pour *Insuline-like Growth Factor*) qui a été étudiée³. Comme pour la mémoire, on peut donc envisager très sérieusement que nos raisonnements, nos calculs, sont influencés par des substances que notre organisme secrète et fabrique en réaction automatique à des stimuli que nous percevons parfois, mais qui d'autres fois nous échappent complètement.

Et assez curieusement à première vue, cela nous ramène aux mycètes. Même si ceux-ci y occupent une place bien moins importante que les bactéries⁴, il faut en effet aborder ici l'importance capitale de notre microbiote⁵. Des études ont montré qu'il serait lié, entre autres, au développement du syndrome d'Asperger (et à l'autisme) aussi bien que de la maladie de Parkinson, de la maladie de Charcot ou de la maladie d'Alzheimer (pour en revenir à la mémoire)⁶. Et en dehors de toute pathologie, il est certain aujourd'hui que notre microbiote influence le développement de notre système nerveux⁷.

En outre, dès les années 1970, des études de neurobiologie (notamment menées aux Etats-Unis par B. Libet) avaient montré que notre corps réagit de manière automatique à certains *stimuli* avant même que notre cerveau ait reçu l'information de ces *stimuli*⁸.

¹ Anonyme, Centre d'Etudes sur le Stress Humain (CESH), sans date, Hormones de stress et mémoire.

En ligne : <https://www.stresshumain.ca/le-stress/effets-sur-la-memoire/hormones-de-stress-et-memoire/>

² M. Payet, Et maintenant, l'hormone de la mémoire ? ds Le Parisien, 6 juin 2005. En ligne :

<https://www.leparisien.fr/societe/et-maintenant-l-hormone-de-la-memoire-06-06-2005-2006013588.php>

³ C. M. Alberini, D. Y. Chen, Memory enhancement: consolidation, reconsolidation and insulin-like growth factor 2, ds Trends in Neurosciences, 35, 5, 2012, pp. 274–283.

En ligne : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22341662/>

M. S. Lewitt, G. W. Boyd, The Role of Insulin-Like Growth Factors and Insulin-Like Growth Factor–Binding Proteins in the Nervous System, ds Biochemistry Insights, 12, 2019, 1178626419842176.

En ligne : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6472167/>

⁴ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 156.

Il s'agit essentiellement de levures - et pour donner une idée de l'importance respective des bactéries et de celles-ci dans notre microbiote, on peut retenir que nos selles contiennent en moyenne 100 milliards de bactéries et 1 million de levures par gramme (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 163).

⁵ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 156.

Chaque individu abrite en moyenne 500 espèces de microbes dans son intestin (sur environ 4000 espèces possibles) soit environ 1 à 1,5 kg de bactéries et de levures (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 163). Or l'intestin contient aussi environ 200 millions de neurones (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 195).

Notre microbiote compte 100 fois plus de gènes que le génome du corps humain (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 201).

⁶ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 198. Malheureusement l'auteur ne cite pas de sources.

Néanmoins pour une liste supplémentaire de pathologies potentiellement concernées par le microbiote (notamment bien sûr obésité, mais aussi diabète, troubles du système immunitaire, allergies, asthme, troubles du système nerveux, états dépressifs, troubles de la mémoire, schizophrénie...) voir M. A. Selosse, *op. cit.*, pp. 182-201.

⁷ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 194.

⁸ R. D. Precht, Qui suis-je, et si je suis, combien ? Paris, Belfond, 2010, pp. 150 et s. (expériences de B. Libet à partir de la fin des années 50).

En gros, face à un *stimulus*, des événements cérébraux inconscients - que l'on peut détecter sous forme de potentiels électriques et qui déclenchent la réaction à ce *stimulus* - précèdent de 0,3 seconde à plusieurs secondes la décision consciente de la réaction requise par ce *stimulus*. Pour B. Libet ce sont donc des processus cérébraux inconscients situés en amont du champ de la décision qui déterminent certaines décisions - et la sensation même d'avoir pris ces décisions.

Même s'ils y font penser, on ne peut pas assimiler ces "potentiels prémoteurs" à de simples réflexes car ils sont suivis d'une décision consciente (ou conscientisée).

Mais dans ces conditions, alors, où se situent la créativité et l'inventivité dont l'humain est si fier ? Que dire de sa pensée et de son libre-arbitre ? Au fond c'est la question de ce que nous sommes qui se pose - et ce, jusque dans notre réalité d'individu, nos comportements et notre personnalité¹.

Pendant longtemps on a considéré que notre activité cérébrale relevait de notre intégrité d'être humain - et que celle-ci reposait sur un corps (ou plutôt un organisme pour employer un terme scientifique) disposant de caractéristiques intrinsèques qui assuraient à cette activité cérébrale un fonctionnement propre à chaque individu selon le hasard de ses connexions neuroniques.

Comme pour l'arabette (*Arabidopsis thaliana*), des recherches plus récentes ont toutefois remis en question cette vision des choses. Au-delà des expériences de neurobiologie initiées dans les années 1960 et 1970, on se rend compte aujourd'hui avec la microbiologie que l'on ne peut plus raisonner en termes d'organisme tel qu'on l'entend classiquement².

On pourrait être tenté - c'est à la mode - de définir notre organisme à symbioses multiples comme un organisme augmenté³. Mais ce serait une erreur. Car ces symbioses, depuis les mitochondries jusqu'au microbiote, sont présentes dans notre lignée depuis des centaines de milliers, et même de millions, d'années : à ce titre on peut les considérer comme partie intégrante de notre être - de toute façon sans certaines d'entre elles nous ne pourrions vivre. Les microbes sont donc partie prenante dans notre fonctionnement, qu'ils influencent considérablement - positivement jusque dans le développement de son système nerveux, mais aussi négativement jusqu'à participer au développement de diverses pathologies, comme on l'a vu plus haut⁴.

C'est donc bel et bien la notion d'organisme, dans son acception scientifique supposant l'intégrité d'un être vivant considéré seul et en lui-même, qui vient à faire question. Car si l'on inclut les mitochondries dans les symbioses multiples - et il n'y a aucune raison de ne pas le faire, même si cette symbiose, acquise, se transmet de génération en génération puisqu'elle est porteuse d'ADN - ce sont tous les Eucaryotes qui sont concernés. Pour ceux-ci au moins, il faudrait donc peut-être redéfinir le terme scientifique d'organisme. On devrait poser avant tout qu'il s'agit d'un objet composite, symbiotique, formé d'une partie visible (une sorte d'infrastructure) et d'une partie invisible⁵ : un ensemble (en partie indissociable) formé d'un hôte, dont la lignée est très ancienne, vivant en symbiose avec des milliards de microbes⁶ qui ont évolué avec ses prédécesseurs pendant des centaines de millions d'années jusqu'à en faire ce que nous voyons - aussi bien la plante que la fourmi, le mycète que l'humain... Cela replace

¹ Pour en revenir au microbiote, chaque individu possède en propre environ 80 % de celui-ci (M. A. Selosse, Jamais seul, p. 166), avec un "dosage" qui concerne en moyenne 4000 bactéries différentes rien que dans notre intestin (environ 500 implantées), en tout 10.000 espèces possibles (M. A. Selosse, *op. cit.*, pp. 163, 172). Pour mémoire, on trouve (environ) 800 espèces de bactéries dans notre bouche, 1300 espèces dans l'interstice entre gencives et dents, 900 espèces dans le nez (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 161). Toutes espèces confondues, un baiser appuyé sur la bouche représente un échange de quelque 10 millions de bactéries...

En moyenne, un humain compterait autant de microbes que de cellules - mais en comptant dans celles-ci les globules rouges, dépourvus d'ADN, qui en représentent 85 % (M. A. Selosse, *op. cit.*, p. 172).

² M. A. Selosse, Jamais seul, p. 194.

³ Dans l'acception aujourd'hui courante, cela recouvre tout autre chose puisqu'il s'agit d'un autre fantasme de l'humain, celui de dépasser ses capacités humaines, même si ce doit être au prix de sa réification (sa "chosification" concrète) - et aussi, au passage, de sa soumission (à la fois à la machine et à deux qui la peuvent la contrôler).

⁴ M. A. Selosse, Jamais seul, pp. 194, 198.

⁵ A une tout autre échelle encore, c'est aussi le cas de l'Univers dont tout ce que nous connaissons ne représente que 5% environ.

Sur ce sujet, voir par exemple Université de Genève, Département d'astronomie, De quoi est fait notre Univers ? 3 décembre 2015.

En ligne : <https://www.unige.ch/sciences/astro/fr/news/de-quoi-est-fait-lunivers/>

⁶ Par microbe, il faut entendre de taille microscopique - et non, comme on le fait couramment et abusivement, micro-organisme pathogène (c'est-à-dire vecteur potentiel de maladie).

Pour l'humain, rappelons qu'il s'agit surtout de bactéries, mais également de mycètes (M. A. Selosse, Jamais seul, p. 156).

clairement ce dernier à sa juste place¹ - celle d'un être vivant parmi tant d'autres, dans un tout où chaque élément n'a dû son évolution qu'au hasard de la combinaison des sous-éléments qui le composent et font de lui ce qu'il est...

Mais peut-on évoquer le hasard ? On a vu plus haut que l'on a tendance à nommer hasard ce dont les ressorts échappent à notre compréhension ou à notre perception... Pour chaque bactérie ou mycète, à l'intérieur ou au contact étroit de chaque organisme composite, en plus de la pression du milieu extérieur qui affecte l'ensemble et chacun des éléments de l'ensemble, il y a eu la pression des autres bactéries ou mycètes qui a sans doute contribué à définir pour chaque espèce, et à une autre échelle pour chaque spécimen de l'espèce - à travers la capacité des différents symbiotes possibles de s'implanter plus ou moins, ou pas, d'une manière générale ou à un moment donné - la forme que cette espèce ou cet individu a revêtu (et ce, en aval comme en amont de ses gènes)²... Peut-être le hasard ne réside-t-il, finalement, que dans la rencontre, le milieu dans lequel elle s'opère et encore le moment où elle s'opère. Tout le reste n'est qu'enchaînements (et cela s'applique sans doute jusqu'aux relations que les mammifères dits supérieurs, dont les humains, entretiennent entre eux).

En tout cas, pour l'être humain³, puisque certains de nos symbiotes participent au développement de notre système nerveux⁴ - et sont ainsi impliqués dans les mécanismes qui prévalent aux connexions (plus ou moins réussies) de nos neurones - il semble indiscutable que la réalité de symbiose multiple de notre organisme contribue grandement à former l'essence de notre individualité et de notre personnalité⁵. On la trouve donc à l'origine, à la fois de l'outil cérébral, mais aussi du mode de fonctionnement propre à chaque spécimen de cet outil - et aussi, malheureusement, jusque dans certains dysfonctionnements de ce dernier ou de l'organisme composite, symbiotique, tout entier⁶...

Car le fonctionnement de l'outil cérébral ne dépend pas seulement de la forme que lui ont donné nos symbiotes, mais encore de substances chimiques qu'il sécrète ou auxquelles il réagit. Et il y a une longue liste d'hormones et de substances potentiellement actives sur notre système nerveux (et au-delà sur notre organisme tout entier) sécrétées par notre microbiote⁷. Pour éclairer ce propos, parmi les substances qui peuvent être synthétisées et secrétées par le microbiote, on peut en retenir trois parmi celles citées par M. A. Selosse⁸. En premier lieu la mélatonine, "l'hormone du sommeil" qui régule nos rythmes chronobiologiques et régit également de nombreuses autres sécrétions hormonales. En second lieu l'acétylcholine, un neurotransmetteur qui agit dans notre système nerveux central (mémoire, apprentissage) ainsi que dans notre système nerveux périphérique pour gérer l'activité musculaire et les fonctions végétatives, celles qui ne sont pas soumises au contrôle volontaire, comme la respiration - qui

¹ Celle que F. Nietzsche lui avait accordée au tout début de "Vérité et mensonge au sens extra-moral"...

F. Nietzsche, Vérité et mensonge au sens extra-moral, Arles, Actes Sud, 1997 (trad. N. Gascuel).

² Parce qu'elle est soumise aux gènes déjà acquis, mais est capable aussi d'en acquérir d'autres, on serait tenté d'écrire qu'une espèce se place en aval comme en amont de ses gènes, et que l'individu se place seulement en aval de ceux-ci - mais ce serait négliger qu'une espèce n'évolue qu'à travers certains de ses individus développant des modifications génétiques susceptibles, à un moment donné et dans un milieu donné, d'apporter un plus qui va donner à ces individus un avantage de santé, de résistance ou de reproduction.

³ C'est sans doute également vrai pour bon nombre de mammifères - au moins, car on ne peut exclure bien d'autres formes de vie animales à l'heure où des recherches montrent aussi bien la capacité de résoudre un problème des poulpes que celle de compter des poissons rouges, sans parler de celle de communiquer des abeilles, mise en évidence depuis longtemps.

⁴ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 194.

⁵ Si l'on considère que notre microbiote influence le développement de notre système nerveux, et que 80 % de ce microbiote est propre à chaque individu : voir M. A. Selosse, Jamais seul, pp. 166, 194.

⁶ Mais cela ouvre la voie de pouvoir remédier à ces dysfonctionnements, et à d'autres sur lesquels les productions du microbiote pourraient agir.

⁷ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 194.

⁸ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 194.

relève encore, on s'en souvient, des mitochondries ! Et enfin, *last but not least*, la dopamine, surnommée "molécule du plaisir", qui participe également à la communication au sein de notre système nerveux (encore un neurotransmetteur) et qui influe directement sur notre comportement, notamment à travers la motivation, la prise de risque, mais aussi... l'addiction. Le rôle de notre microbiote ne s'arrête pas là. A l'exemple des dysfonctionnements qu'il peut engendrer, on entrevoit qu'il peut encore favoriser la production par notre organisme de certaines substances plutôt que d'autres, ou mieux que d'autres... En plus de l'action directe des substances qu'il peut lui-même fabriquer, il y a donc potentiellement une action indirecte de notre microbiote sur la production de substances chimiques par le reste de notre organisme. L'intrication entre les divers éléments de notre organisme composite (entre notre corps visible et notre corps invisible) est telle qu'elle pourrait concerner jusqu'aux fonctionnements étudiés depuis quelques décennies par les neurobiologistes - et notamment ceux, chers à B. Libet, qui régissent nos réactions à un *stimulus* sans que notre volonté ait le temps d'intervenir (autrement qu'en opposant un *veto* au processus ainsi engagé). En fait, quoiqu'ignorée aujourd'hui par la Faculté, on devine que la microbiologie devrait à l'avenir occuper une place considérable dans la médecine¹ - ne serait-ce que parce que si elle peut générer des dysfonctionnements, elle peut aussi permettre d'y remédier. En attendant, comme toujours quand la science officielle est victime de son traditionalisme et des réticences face au changement qui l'accompagnent, c'est l'à-peu-près, le charlatanisme ou le mercantilisme qui risquent de prévaloir... au risque de déconsidérer une voie extrêmement prometteuse - mais finalement cela sert aussi les tenants de l'immobilisme qui campent sur leur savoir exclusif. Pour illustrer cette position tout en revenant aux mycètes, on peut considérer le cas des champignons médicinaux utilisés depuis des générations en Asie². Encore aujourd'hui, notamment au Japon, ils servent dans des traitements hospitaliers contre le cancer. On peut également mobiliser les polysaccharides qu'ils contiennent, en particulier certains Ganodermes, pour lutter contre des phénomènes inflammatoires³. Et cela ne concerne pas que l'homme : récemment, ce sont des virus attaquant les colonies d'abeilles que P. Stamets et son équipe ont traités (avec succès) en utilisant des mycètes⁴, encore une fois des polypores, ici de la famille de l'amadou (*Fomes*) et du Reishi (*Ganoderma*). Mais de la même manière que M. Sheldrake paraît ignorer, comme on l'a vu plus haut, les travaux de l'INRAE sur la culture de la truffe blanche du Piémont, les Européens, à quelques exceptions près⁵, semblent imperméables aux recherches asiatiques ou américaines sur les mycètes - ainsi qu'aux applications très concrètes qui en découlent... et c'est grand dommage, car le matériau est là et il suffit de l'utiliser. Mais après tout, c'est peut-être, chez les uns comme chez les autres, encore une histoire de microbiote...

¹ En ce sens M. A. Selosse, Jamais seul, pp. 173, 179.

² Sur ce sujet, on peut lire le livre fondateur de J. Ying, X. Mao, Q. Ma, Y. Zong, H. Wen, *Icones of medicinal Fungi from China*, Pékin, Science press, 1987 (*Icons of medicinal fungi from China* pour la réédition de 1989) et plus récemment, plus technique et en termes plus médicaux, R. Rogers, *The Fungal Pharmacy*, Berkeley, North Atlantic Books, 2011.

Il s'agit là bel et bien de champignons, c'est-à-dire des carpophores apparents des mycètes (même si depuis, on s'est également intéressé à leur mycélium).

³ C'est le cas de *Ganoderma lucidum* (le Ganoderme luisant), le Reishi ou champignon d'éternité des Asiatiques, mais aussi de son cousin plus courant (parce que moins beau et donc moins cueilli pour faire des compositions florales) *Ganoderma applanatum* (le Ganoderme aplani) que j'ai personnellement utilisé avec un certain succès en décoctions longues.

⁴ P. E. Stamets, N. L. Naeger, J. D. Evans, J. O. Han, B. K. Hopkins, D. Lopez, H. M. Moershel, R. Nally, D. Sumerlin, A. W. Taylor, L. M. Carris, W. S. Sheppard, *Extracts of Polypore Mushroom Mycelia Reduce Viruses in Honey Bees*, *ds Nature*, Scientific Reports, 8, 2018, article 13936 (4 octobre 2018).

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-018-32194-8>

⁵ En France, on peut citer l'ouvrage de B. Donatini, *Les vertus médicinales des champignons*, Cormontreuil, Médecine Information Formation, 1999.

Au final en tout cas on voit bien que les réactions et les comportements de l'humain lui-même, ses calculs, ses stratégies, sa créativité, sa curiosité, son inventivité, répondent à des *stimuli* divers - dont certains, internes, bio-chimiques sont liés à notre microbiote qui est en outre potentiellement susceptible de sécréter des substances agissant sur le traitement des *stimuli* extérieurs.

Cela ne remet en question ni notre spécificité¹, ni notre personnalité d'individu. Simplement il nous faut passer outre à des siècles de pensée pour admettre et poser comme base que nous sommes, comme tous les Eucaryotes à des degrés divers, un organisme composite, symbiotique, formé d'une partie visible (notre "corps" tel qu'on l'entend depuis des siècles) et d'une partie invisible (microbienne, impliquant d'abord bactéries mais aussi mycètes) dont on n'a découvert l'importance dans le fonctionnement de l'ensemble que ces quarante dernières années². Sans oublier en outre que nous sommes de surcroît un organisme composite soumis à des réactions neurobiologiques qui précèdent parfois l'arrivée d'un *stimulus* au cerveau... Avec ces réserves (qui changent complètement son acception actuelle) le terme d'organisme pourrait convenir.

Couramment, et sur la même base bien clairement posée, le terme de corps, moins chargé de connotations scientifiques restrictives que celui d'organisme, pourrait également faire l'affaire. Son acception n'a jamais été très limitative - mais depuis l'Antiquité il a quand même désigné la partie visible de notre être, opposé à la notion relativement vague de "l'âme" qui regroupait (entre autres, et selon les systèmes de pensée) le principe vital animant le corps³, la conscience, la conscience de soi, la capacité de penser - et surtout, surtout, le désir de survie de l'homme face à la conscience de son anéantissement dans la mort... Une redéfinition stricte s'imposerait donc là aussi, qui mettrait bien perspective qu'il s'agit d'une des formes prises par le vivant au terme d'une évolution de plusieurs centaines de millions d'années.

Du fait de la nécessité d'un outil spécifique - un cerveau autorisant la perception et la conception du temps (permettant justement entre autres de concevoir sa mort) - le calcul, la projection dans le futur ne semblent pouvoir concerner ni les végétaux ni les mycètes. Mais on ne peut en dire autant de certains animaux⁴ - et là encore cela ramène l'homme à sa juste dimension.

¹ Les caractères spécifiques de notre espèce.

² Ainsi que l'a rapporté M. Sheldrake (Le monde caché, p. 47) « la "perte" du sentiment d'identité, les illusions sur l'identité propre et l'impression d'un "contrôle externe" [...] sont tous des symptômes potentiels de la maladie mentale ». Mais il ne s'agit que de symptômes *potentiels* : ce n'est pas perdre son sentiment d'identité ni se bercer d'illusions sur son identité propre que d'accéder à une connaissance plus poussée de ce que l'on est. C'est même tout le contraire, quand l'illusion était dans ce que l'on a cru pendant des siècles - sans quoi l'on continuerait aujourd'hui à se concevoir comme aux siècles de foi aveugle du Moyen Age... Mais il ne faut jamais oublier à ce titre que dans quelques siècles, si l'humanité survit, notre savoir fera rire, ainsi que l'a souvent fait remarquer le médiéviste M. Pastoureau - par exemple dans La symbolique médiévale, matériaux, nombres, gestes, images et couleurs, Conférence du 23 janvier 2017 à l'Université de Cergy-Pontoise avec les archives départementales du Val d'Oise (vers 58'25 et encore vers 1h08'30).

En ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=oKsjwZRmSVk>

³ Il est amusant de penser qu'à ce titre, au-delà des réactions électro-chimiques qui assurent la vie de l'ensemble, une partie de l'âme est formée... de microbes.

⁴ Même si ce n'est pas forcément le meilleur exemple, on peut rappeler la réponse de la femelle gorille Koko, à qui l'on avait appris le langage des sourds-muets, et qui à la question "Where do gorillas go when they die ?" (où vont les gorilles quand ils meurent ?) avait répondu "Comfortable hole bye" (trou confortable ciao). Certes Koko avait été élevée parmi des humains. On peut dire à ce titre qu'elle avait subi une véritable acculturation. Et pour lui poser des questions sur la mort il avait bien fallu lui expliquer de quoi il s'agissait. Sa réponse pouvait donc comporter une part très humaine... et très convenue (d'autant que les gorilles n'enterrent pas leurs congénères morts). Mais on ne peut exclure que le mot "hole" eût pour elle une connotation dépassant sa plus simple acception de "trou" pour aller jusqu'à recouvrir "un endroit où les choses se perdent". Pour bien faire il aurait fallu que Koko pût aussi communiquer avec d'autres gorilles non "éduqués" et leur poser la question, à eux...

Sur ce sujet en tout cas, voir F. Patterson, E. Linden, The Education of Koko, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1981, p. 191.

Avec l'approche des Eucaryote proposée plus haut, c'est toutefois la notion de règnes (végétal, animal, fongique, bactérien) qui vole en éclat : qu'est-ce, en effet, que ces règnes formés d'espèces qui ne peuvent vivre sans le recours symbiotique (et même endosymbiotique) à des espèces... d'autres règnes ? Le terme de règne, comme celui d'organisme, serait donc également à redéfinir...

1.2.3.3. Retour vers la forêt et ses mycètes.

Pour retrouver un sol plus ferme - sans cependant oublier notre réalité d'organisme composite affectant aussi bien nos réactions que nos comportements - retournons donc à la forêt que nous avons délaissée pour cette longue mais nécessaire digression.

S'il ne se plaçait pas toujours au-dessus de tout, l'homme pourrait comprendre que les arbres (et les mycètes) sont assez remarquables et magnifiques en eux-mêmes pour n'avoir pas besoin d'être dotés de sentiments humains. C'est tant mieux toutefois si cela permet à certains humains de les apprécier et de les respecter davantage... mais en n'oubliant pas qu'on peut les aimer bien mieux en apprenant à les connaître et en les aimant pour eux, pour ce qu'ils sont réellement¹, plutôt qu'en les dotant de caractères anthropiques qui demeurent, concrètement, du domaine de la fable.

Mais concrètement, justement, le résultat des échanges réalisés entre les plantes et les mycètes (ou entre les plantes par les mycètes) est indiscutablement une forêt, ou un écosystème, bien plus solide, bien plus performant, et bien plus résistant - tout au moins bien sûr tant que l'homme ne vient pas le perturber à grands coups de pesticides et de fongicides au lieu de chercher à profiter au mieux de ce qu'est cet écosystème et de ce qu'il peut offrir. Car ce que l'homme pense avoir fait de mieux (pour lui) en tentant de soumettre la croissance et la "bonne venue" des plantes à ses seuls soins - dans l'espoir de tout contrôler, de limiter les aléas et d'obtenir une production plus importante en travaillant moins - n'a finalement produit qu'une chaîne de réactions souvent perverses. On sait depuis longtemps que cette chaîne inclut l'adaptation des plantes, des mycètes ou des animaux considérés comme parasites ou nuisibles, en tout cas importuns - adaptation qui les rend plus solides et plus résistants, ce qui nécessite des traitements toujours plus durs... et plus dangereux, y compris pour l'homme. On découvre à présent (malgré des exemples documentés dans le passé, les *Dirty Thirties* en Amérique notamment) que cette chaîne de réactions va jusqu'à la modification des conditions macro-climatiques (notamment une sécheresse pouvant aller jusqu'à la désertification) - et par accumulation de ces modifications locales, à la modification générale d'une partie très conséquente du climat². Finalement, en tentant de s'émanciper des règles de la nature, de dominer et de maîtriser des processus dont l'équilibre subtil lui échappait complètement - parce que trop subtil en fait pour ses connaissances, malgré toutes ses prétentions - l'espèce humaine a mis en place les bases d'un déséquilibre profond qui pourrait aller jusqu'à la remise en cause de sa propre survie (ou tout au moins de la survie d'une part importante de ses populations sur la planète).

Il reste beaucoup, beaucoup, à apprendre.

Et même infiniment, sans doute, à l'échelle des capacités et de la durée d'une espèce comme la nôtre, même si elle veut se croire éternelle.

Au contraire d'imaginer que la science actuelle peut tout expliquer, peut rendre compte de tout, peut tout gérer, il faut donc se dire et se répéter que son savoir est provisoire, en constante évolution, qu'elle n'arrivera peut-être jamais à tout embrasser, qu'au demeurant elle n'en aura peut-être pas le temps - et qu'il reste, et restera peut-être toujours, bien plus d'inconnues que

¹ Pour en savoir plus sur ce qu'est un arbre, on peut lire avec plaisir et profit l'ouvrage de L. Tillon, Être un chêne, Sous l'écorce de Quercus, Arles, Actes Sud, 2021.

² Voir plus bas dans le Chapitre 9, L'âge du bronze.

d'acquis... A défaut, si l'on continue à se satisfaire et se réjouir d'affirmations catégoriques, à caractère péremptoire et définitif, si on laisse certains faire un mythe de la vérité scientifique en lui déniaient son caractère évolutif, lorsque malgré les freins mis en place de nouvelles découvertes, ou la simple évidence d'une réalité divergente, viendront faire voler en éclat ces affirmations, c'est tout le processus scientifique qui sera remis en cause - et ce sera le retour à d'autres approches de la réalité, à d'autres mythes qui en seront, comme dans le passé, bien plus éloignés. Les prétentions de certains scientifiques d'aujourd'hui nourrissent peut-être l'obscurantisme de demain.

Mais revenons-en à nos mycètes. Dans la forêt, la prairie, ou le jardin, leur rôle ne se limite pas au transfert, à l'échange et à la répartition de nutriments. Ils transmettent également des substances chimiques (notamment des hormones, phéromones ou ectomones)¹ fabriquées par les plantes et absorbées en même temps que les nutriments. Là encore, ces substances chimiques sont produites automatiquement par les plantes en réaction à des *stimuli* qu'elles enregistrent grâce à tout un système de capteurs qui correspondent chez nous au toucher, au goût, à l'odorat et à l'ouïe.

Tout le monde sait que les plantes sont équipées de récepteurs photosensibles. Ce sont les chloroplastes², dont on a vu plus haut qu'ils sont fondamentaux pour les plantes, même si certaines les ont perdus par la suite. Assurant la fonction chlorophyllienne, ils sont présents un peu partout - mais en particulier, pour les arbres et arbustes, dans un tissu abondant dans les feuilles et dans la partie verte ou marron clair située au bout des rameaux : le chlorenchyme³. Celui-ci est très important. A la fin de l'hiver et au printemps, la température s'élève progressivement, mais arbres et arbustes à feuillage caduc n'ont pas encore de feuilles. C'est alors le chlorenchyme des rameaux qui procure l'énergie nécessaire pour réactiver la circulation de la sève. Celle-ci est ainsi à même de transporter les sucres - stockés en hiver dans les parties aériennes basses et les racines de l'arbre ou de l'arbuste (sous la forme d'amidon, grâce aux amyloplastés évoqués plus haut, et de saccharose)⁴. Et ce sont ces sucres, enfin, qui vont fournir les ressources permettant l'éclosion des bourgeons foliaires, précédemment gonflés et assouplis par la hausse des températures⁵. A partir de là, les feuilles vont pouvoir prendre le relais et assurer l'essentiel de la fonction chlorophyllienne de la plante (grâce au chlorenchyme bourré de chloroplastes qu'elles contiennent).

Mais les feuilles contiennent bien d'autres capteurs - qui servent aussi d'émetteurs - sous la forme de minuscules orifices (les stomates) qui garnissent principalement la face inférieure des feuilles. Ce sont en effet ces stomates qui permettent les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant - et en outre la transpiration de l'arbre indispensable à la circulation de la sève : en l'absence d'un cœur pulsant les fluides à travers l'organisme, comme chez les animaux, c'est en effet la dépression interne causée par la perte de l'eau passée dans l'atmosphère par évapotranspiration qui assure la montée de la sève⁶.

¹ Les phéromones sont actives sur les individus de la même espèce, les ectomones ont un spectre plus large et peuvent agir sur les individus d'espèces différentes.

² Sur ces chloroplastes, voir par exemple L. Tillon, Être un chêne, pp. 70-71.

³ Il y en a aussi dans l'écorce, mais moins. Sur le chlorenchyme, voir entre autres L. Tillon, Être un chêne, pp. 67-69, 81-82, 145, 170.

⁴ L. Tillon, Être un chêne, pp. 66, 71, 85, 95-96.

L'amidon assure en outre en hiver une fonction d'isolant thermique pour les parties basses de la plante où il est stocké (*op. cit.*, p. 96).

⁵ L'activité des cellules de la plante se réveille en effet quelques degrés en-dessous du zéro de végétation de chaque espèce de plante (le seuil à partir duquel cette espèce peut se développer). Les bourgeons peuvent ainsi "mûrir" avant de recevoir l'influx énergétique printanier.

⁶ Elle bénéficie en outre du renfort de la lignine, hydrophobe, qui joue ici, comme on l'a vu plus haut, le rôle d'une multitude de petits clapets anti-retour, conjointement au phénomène d'osmose. Dans une solution, ici la sève, celui-ci assure le mélange les fluides de densités différentes : même si cela reste très faible comparé à

Par les stomates, les feuilles ont les moyens d'accéder assez largement à leur environnement. Pour appréhender celui-ci, elles sont munies de récepteurs chémosensibles qui leur permettent de détecter des substances chimiques en solution (une forme de goût) ou volatiles (une forme d'odorat).

Ces récepteurs chémosensibles aux substances volatiles participent bien sûr au premier chef à l'expression chimique évoquée plus haut - et ce d'autant plus qu'en réaction automatique à ce qu'ils détectent, la plante fabrique des réponses, pour elle-même et pour son voisinage. Là encore ce n'est pas voulu, et ce n'est pas de l'altruisme : simplement, dans la nature, et dans le cours de l'évolution, les individus qui se mettaient à produire des substances qui parvenaient le mieux à délivrer une information utilisable par leur environnement étaient ceux qui résistaient le mieux - en contribuant à assurer une certaine stabilité de celui-ci (au moins la stabilité dont ils avaient besoin). Ils étaient donc dotés d'un avantage par rapport aux autres - et à terme le caractère qui leur conférait cet avantage devenait dominant...

Mais nous n'en avons encore pas fini avec les capteurs dont disposent les plantes pour appréhender leur environnement - et réagir du mieux possible à ce qui peut s'y trouver modifié et qui peut directement ou indirectement les affecter. Les plantes disposent aussi dans leurs feuilles de cellules équipées de molécules leur permettant de réagir si on les touche (ce qui est très net chez les plantes carnivores, ou chez *Mimosa pudica*, la sensitive, qui se replie sous une caresse) et d'autres qui leur permettent de réagir à des sons (ce qui s'apparente à une forme de l'ouïe)¹.

Ce dernier sens a longtemps fait question, et il a fait l'objet de nombreuses études, notamment quant à l'effet que certaines fréquences peuvent avoir sur la croissance des plantes². On a également étudié la capacité qu'ont ces ondes sonores de favoriser ou de développer la production chez les plantes de substances propres à lutter contre l'agression de parasites pathogènes des cultures (virus, bactéries ou mycètes)³ - ou bien, très intéressant aujourd'hui, contre la sécheresse (pour le riz par exemple)⁴. Ces études ont surtout été menées en Asie, ou

l'évapotranspiration, la sève du bas de la plante, très chargée en nutriments, va donc être aspirée vers celle du haut qui s'est déjà déchargée d'une partie de ceux-ci et se trouve donc moins dense.

Sur le sujet voir L. Tillon, Être un chêne, p. 72.

¹ C. Lenne, Une communication pleine de sens, ds Pour la Science, Hors-série n° 101, novembre-décembre 2018, pp. 30-35, ici pp. 32-33.

En ligne : <https://www.pourlascience.fr/sd/biologie/une-communication-pleine-de-sens-14830.php>

² Sur ce thème, voir F. Frongia, L. Forti, L. Arru, Sound perception and its effects in plants and algae, ds Plant Signaling and Behavior, 15, 12, 2020.

En ligne : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7671032/>

Également J. Jung, S.-K. Kim, J.-Y. Kim, M.-J. Jeong C.-M. Ryu, Beyond Chemical Triggers, Evidence for Sound-Evoked Physiological Reactions in Plants, ds Frontiers in Plant Science, 9, article 25, 2018.

En ligne : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00025/full>

Et encore : S. Jatmika, A. Purwanto, W. S. Brams Dwandaru, Effect of Sound Vibration towards the Stomata Opening Area via Edge Detection Analysis, ds Revista Mexicana de Fisica, 68, 5, sept. oct. 2022.

En ligne : <https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf/article/view/6104>

³ C'est le cas d'une étude menée sur la fameuse arabette (*Arabidopsis thaliana*) en proie à une attaque du mycète *Botrytis cinerea* : B. Choi, R. Ghosh, M. A. Gururani, G. Shanmugam, J. Jeon, J. Kim, S.-C. Park, M. J. Jeong, K.-H. Han, D.-W. Bae, H. Bae, Positive regulatory role of sound vibration treatment in *Arabidopsis thaliana* against *Botrytis cinerea* infection, ds Nature, Scientific Reports, 7, 2017, article n° 2527.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-017-02556-9>

Le *Botrytis cinerea* est responsable d'une pourriture grise qui attaque la vigne, la tomate ou la fraise. Il est qualifié de pourriture noble dans le processus d'obtention de vins liquoreux du type Sauternes, Coteaux-du-Layon ou Sainte-Croix du-Mont.

⁴ M.-J. Jeong, J. Il Cho, S.-H Park, K.-H. Kim, S. Kon Lee, T.-R. Kwon, S.-C. Park, Z. S. Siddiqui, Sound frequencies induce drought tolerance in rice plant, ds Pakistan Journal of Botany, 46, 6,

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/274890230_Sound_frequencies_induce_drought_tolerance_in_rice_plant

par des chercheurs d'origine asiatique, depuis les années 1970. Selon un phénomène déjà évoqué pour les champignons médicinaux, elles ont eu peu d'impact en Europe, et elles n'ont pas atteint les grandes revues scientifiques occidentales, à quelques exceptions près¹.

En France, on doit signaler les recherches individuelles menées par J. Sternheimer depuis les années 1970. Associant à chaque acide aminé des chaînes protéiniques un son différent, elles visent à produire pour chaque espèce² les "mélodies" de ces chaînes protéiniques (appelées ici protéodies) qui seraient propres à favoriser la croissance de certaines plantes ou leur résistance à certaines agressions... C'est sous cet angle que l'université de Cergy-Pontoise étudie depuis 2018 s'il est possible de doper la résistance du pois (*Pisum Sativum*) à la sécheresse grâce à certaines séries d'ondes sonores³. On ne peut toutefois dire encore si les protéodies constituent un réel perfectionnement ou un simple enjolivement des fréquences sonores étudiées en Asie. Mais, sans jeu de mots, elles s'inscrivent dans le même sens.

En tout cas, au contact d'un *stimulus*, positif ou négatif, décelé par l'un de leurs nombreux capteurs sensoriels, les plantes fabriquent automatiquement des hormones (phéromones et/ou ectomones)⁴ et d'autres substances chimiques volatiles, principalement des terpènes mais aussi des phytoncides⁵. Ces derniers, qui limitent le développement des bactéries et des champignons saprophytes (qui attaquent les feuilles et le bois)⁶ sont en fait émis en permanence pendant la belle saison, en particulier en milieu de journée, mais leur production augmente à la détection d'une prolifération d'agresseurs éventuels.

En outre, toutes les réactions de l'arbre passent par des impulsions électro-chimiques au niveau de leurs cellules. Elles produisent ainsi de manière continue des micro-décharges électriques qui provoquent localement une ionisation de l'air (en ions négatifs à la belle saison)⁷. Comme la production de phytoncides, celle-ci augmente en cas d'agression. Une attaque bactérienne ou fongique sur les feuilles entraîne de la sorte indirectement une production accrue d'ions négatifs. Cerise sur le gâteau, ces ions stimulent la croissance des cellules végétales, et de ce fait la réparation des tissus touchés par un éventuel agresseur, tout en assurant la diffusion des "messages d'alerte" chimiques envoyés automatiquement en réaction par la plante...

Grâce à leurs récepteurs chémosensibles, les plantes voisines, de la même espèce ou d'espèces différentes, absorbent les substances émises. Elles sont ainsi capables de réagir aux *stimuli* qui

¹ C'est le cas de l'étude sur l'arabette (*Arabidopsis thaliana*) citée ci-dessus, publiée dans la revue Nature.

² Les protéines sont formées d'une ou de plusieurs chaînes d'acides aminés qui, selon le code génétique de chaque espèce, sont rangés selon un ordre particulier à celle-ci. Si chaque acide aminé correspond à une longueur d'onde particulière, on peut donc créer des séries de sons correspondant chacune à une protéine.

³ O. Gallet, Acoustique et adaptation du vivant, les plantes sont-elles sensibles aux sons ? ds Université ouverte, des conférences-débats pour tous, Université de Cergy-Pontoise, 18 novembre 2021.

En ligne : <https://universiteouverte.u-cergy.fr/acoustique-et-adaptation-du-vivant-les-plantes-sont-elles-sensibles-aux-sons/>

On ne peut toutefois pour le moment définir si ces "protéodies" ne sont au fond qu'un enjolivement des fréquences *a priori* plus simples étudiées par d'autres chercheurs dans le monde, ou bien si elles permettent réellement d'aller plus loin.

⁴ Sur le rôle des hormones, très brièvement évoqué, voir L. Tillon, Être un chêne, Sous l'écorce de Quercus, Arles, Actes Sud, 2021, p. 54.

Aussi P. Kundu, P. Bera, S. Mishra, J. Vadassery, Regulatory role of phytohormones in the interaction of plants with insect herbivores, ds M. I. R. Khan, A. Singh and P. Poór (Dir.), University of Western Australia, Plant Hormones in Crop Improvement, janvier 2023, Chapitre 3, pp. 41-64, et notamment (dans le résumé) :

« *Phytohormones are prime signaling molecules that coordinate many physiological phenomena* » (les phytohormones [hormones végétales] sont des molécules de signalisation de premier plan qui coordonnent de nombreux phénomènes physiologiques).

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323918862000033>

⁵ L. Tillon, Être un chêne, Sous l'écorce de Quercus, Arles, Actes Sud, 2021, pp. 101-103.

⁶ Le terme est préférable à celui de saprophyte qui faisait référence à des plantes (phyto, du grec ancien φυτόν, phytón « végétal) alors qu'il s'agit ici de mycètes et de bactéries.

⁷ L. Tillon, Être un chêne, p. 104.

ont déclenché la production de ces substances, avant même d'être en contact direct avec l'objet de ces *stimuli* (et parfois sans que celui-ci les atteigne). Ces mécanismes, qui se sont mis en place au cours de millions d'années d'évolution, permettent à toute la forêt, ou à la prairie, voire au jardin, de réagir à l'objet d'un *stimulus* local - que celui-ci soit un bien ou un mal potentiel pour la plante (car il existe là aussi des hormones de bien-être et des hormones de stress). Il peut s'agir tout aussi bien de l'installation d'un essaim susceptible d'aider à la pollinisation¹, que de l'agression d'insectes (scolytes par exemple), de la frayure d'un cerf ou de la caresse d'un humain... On ne garantit pas cependant dans ce dernier cas que les phéromones émises envoient des signaux, et des signaux positifs, aux arbres voisins. En revanche, il est certain que les ions négatifs qu'émettent les arbres, même lorsqu'ils ne sont soumis à aucun stress, ont un impact sur l'organisme composite des animaux, en particulier des mammifères (et donc, des humains) : ils réduisent, de manière là encore automatique et inconsciente, le niveau de stress et d'anxiété, provoquant donc indirectement une baisse du niveau de sérotonine, l'hormone produite pour lutter contre ces troubles². Quant aux phytoncides volatils qui entourent l'arbre, ils stimulent (toujours chez les mammifères, et toujours de manière inconsciente) la production des lymphocytes qui sont ordinairement chargés de les protéger contre de nombreuses maladies³... C'est entre autres pour cela qu'une promenade en forêt fait tant de bien !

Quant aux arbres en eux-mêmes, leur expression (ou communication) chimique, tant aérienne que mycorhizienne, demeure à étudier en détail. Pour les hormones, on sait qu'elle comporte une part commune à nombre d'espèces (ectomones) et une part spécifique à chaque espèce (phéromones), mais il reste à définir ces parts. Il faudra cependant longtemps pour déchiffrer cette expression chimique : on aurait déjà identifié plusieurs dizaines de milliers de substances allélochimiques⁴. Et sans doute longtemps aussi avant qu'on s'y intéresse vraiment, en profondeur, si l'on se réfère à l'étude du langage des cétacés. Il y a plus de cinquante ans en effet que l'on a découvert l'existence d'une forme de langage chez les dauphins, les orques et les baleines⁵. On aurait pu enregistrer les sons qu'émettaient ces cétacés, tout en observant parallèlement leurs comportements, puis soumettre ces sons à un logiciel de déchiffrement - de codes secrets, par exemple. Mais ce n'est que récemment, semble-t-il, avec la mode de l'intelligence artificielle, que l'on a eu l'idée un peu partout d'entrer l'ensemble des sons que les cétacés émettent (en lien avec leurs comportements, ce qui apporte un gros plus par rapport au déchiffrement d'une langue morte par exemple) dans un ordinateur susceptible de les analyser et de les décrypter⁶. Contrairement à ce que suggèrent les titres de certains médias, on est encore

¹ La plus ancienne abeille connue à ce jour a été retrouvée dans un bloc d'ambre et datée de -100 Ma. G. Poinar, *Discoscapidae* fam. nov. (Hymenoptera: Apoidea), a new family of stem lineage bees with associated beetle triungulins in mid-Cretaceous Burmese amber *ds Palaeodiversity*, 13, 1 (Bio One, 12, 1), janvier 2020, pp. 1-9.

En ligne : <https://bioone.org/journals/Palaeodiversity/volume-12/issue-1/pale.v13.a1/Discoscapidae-fam-nov-Hymenoptera--Apoidea-a-new-family-of/10.18476/pale.v13.a1.full>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Découverte du plus vieux fossile d'abeille, âgé d'environ 100 millions d'années, *ds Sciences et Avenir en ligne*, 14.02.2020.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/une-abeille-primitive-retrouvee-piegee-dans-l-ambre_141551

² L'effet des ions négatifs sur la sérotonine est connu depuis les années 1970 au niveau sanguin, mais on se posait alors la question de leur effet au niveau cérébral - alors même que leur effet sur les troubles du sommeil et l'anxiété avait pourtant été décrit : J.-M. Olivereau, L'ionisation atmosphérique et ses conséquences sur le comportement des animaux et de l'homme, *ds L'année psychologique*. 76, 1, 1976, pp. 213-244, ici (troubles du sommeil et anxiété) p. 225.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_1976_num_76_1_28137

³ L. Tillon, Être un chêne, p. 103.

⁴ Par substances allélochimiques, on entend substances susceptibles d'influencer d'autres organismes.

⁵ Au-delà des cétacés, sont également concernés par un langage, entre autres, parmi les mammifères, les singes et les éléphants...

⁶ I. Bellin, L'IA décode les signaux des cétacés, *ds Data Analytics Post (ENS Paris-Saclay)*, 13 mai 2021.

loin d'y parvenir... Et au demeurant ce n'est peut-être pas un mal - car si l'on perce un jour le secret du langage des cétacés, qui sait quels messages certains humains leur délivreront, à quel ignoble embrigadement (ou chantage) ils tenteront de se livrer¹ ?

Pour les plantes en tout cas (qui ne disposent pas d'un langage issu d'une volonté de communiquer) on en est encore loin... Mais il pourrait être fort utile de connaître certains signaux d'alerte qu'elles émettent pour les aider à lutter plus efficacement (et bien sûr naturellement) contre une menace, qu'elle soit d'origine parasitaire² ou climatique³.

En tout cas, avec les substances chimiques qu'elles produisent, on a de véritables informations émises et reçues quasiment en permanence, automatiquement, par les plantes. Elles concernent essentiellement les changements qui interviennent dans le milieu - biotope ou écotope de dimensions plus restreintes⁴.

En véhiculant ces substances chimiques en plus de nutriments, les mycètes mycorrhiziens participent donc à la diffusion des informations produites par un individu vers l'ensemble des individus de son espèce, et aussi parfois d'autres espèces - à une autre échelle, de temps mais aussi d'espace, que les substances volatiles susceptibles d'être émises par les stomates. D'une part en effet, les mycètes les diffusent plus lentement que par les voies aériennes des plantes, mais d'autre part grâce à l'étendue de leurs hyphes ils leur donnent une tout autre dimension spatiale. C'est ce que l'on qualifie parfois de *Wood Wide Web*⁵ ou d'autoroutes de l'information⁶, souvent avec des références anthropiques assez regrettables - car une fois de plus, les plantes d'une part et les mycètes d'autre part le font automatiquement, mécaniquement⁷, d'une manière qui échappe à toute volonté ou intention parce que cela se produit en dehors de toute conscience. Cela évoque bien sûr nos propres réactions, situées hors du champ de la conscience, à des *stimuli* extérieurs ou à des substances émises par certains éléments de notre corps composite (notre microbiote par exemple). Et on ignore encore tout de la façon dont ce corps composite réagit très vraisemblablement - de manière là encore automatique et inconsciente - à certaines fréquences d'ondes, en-dehors de l'abrutissement (que l'on espère passer) provoqué par l'exposition à des nuisances sonores, notamment celles des boîtes à rythme qui accompagnent certaines soirées. A l'opposé de ces phénomènes pernicioeux, les capacités des "coupeurs de feu", qui sont parfois régulièrement (et souvent discrètement) convoqués par certains hôpitaux auprès des grands brûlés pour améliorer leur état, semblent relever d'ondes (peut-être de très basses

En ligne : <https://dataanalyticspost.com/ia-decode-signaux-cetaces/>

Moins triomphaliste, M. Kleczinski, A terme, des scientifiques pensent pouvoir communiquer avec les cachalots, ds NeozOne, 15 décembre 2021.

E ligne : <https://www.neozone.org/animaux/a-terme-des-scientifiques-pensent-pouvoir-communiquer-avec-les-cachalots/>

¹ On sait que certaines armées ont déjà tenté d'utiliser les dauphins pour effectuer des missions telles que poser des mines - officiellement, pour les repérer et les dégager... au péril de leur vie, toutefois, déjà.

C'est le cas (repérage et dégagement des mines) de l'U.S. Navy Marine Mammal Program (NMMP) et on peut être sûr que bien d'autres pays ont suivi l'exemple des Etats-Unis, mais plus discrètement.

² On a évoqué plus haut les insectes (avec les scolytes) mais il ne faut pas négliger les bactéries ni les mycètes parasites ou commensaux (telles les rouilles, oïdium, mildiou ou encore moniliose bien connus des jardiniers et des agriculteurs).

³ On connaît déjà des substances, proches d'hormones (des flavonoïdes ou des bêtaïnes) qui permettent à la plante de mieux affronter le stress lié à la chaleur ou au manque d'eau. A ce sujet, L. Tillon, Être un chêne, p. 49.

Malheureusement il semble qu'il s'agit de phéromones (spécifiques) plutôt que d'ectomones (universelles)...

⁴ 2500 à 15000 m² (0,25 à 1,5 ha). On pourrait envisager des surfaces encore moindres, de l'ordre de 1000 à 2500 m², si l'on veut lutter contre la sécheresse (et l'augmentation corollaire des températures) dans les agglomérations et surtout les zones pavillonnaires qui les entourent.

⁵ Par exemple M. Shelldrake, Le monde caché, pp. 15, 35, 53, 325-328, 334, 341-347, 352-353, 355-358, 360, 363-365, 367-368, 448-449...

⁶ M. A. Selosse, Jamais seul, p. 46 (avec des guillemets).

⁷ Au sens de la mécanique biochimique, ou électro-chimique, et de leurs enchaînements naturels.

fréquences) émises naturellement par le corps de ces personnes - plutôt que d'un "don" nécessitant d'accomplir divers rituels¹.

Il semble indéniable en tout cas aujourd'hui que les plantes, comme les animaux, sont capables de perceptions sensorielles étendues, en partie (mais en partie seulement) grâce à leurs partenaires fongiques. Même si ces perceptions ne sont pas conscientisées, si tout se passe de manière automatique, par réactions bio- et électro-chimiques, les *stimuli* perçus entraînent la production de substances chimiques (notamment des hormones) correspondant à des informations positives ou négatives pour la plante - que l'on peut sans doute, sans anthropiser, rattacher à du bien-être ou du stress : en tout cas c'est comme ça qu'on l'interpréterait chez l'humain, même dans le cas d'une réaction automatique, dépourvue de toute conscience.

Il y a donc bien-être ou stress. Et ceux-ci méritent certainement attention et respect. Attention parce que cela permet le cas échéant d'aider la plante, respect parce que l'on ne se trouve pas devant un objet inerte. Certains diront que c'est la porte ouverte à une forme d'animisme. L'animisme toutefois dote en général ses objets de sentiments humains. Ici il ne s'agit que de chercher à leur accorder la dimension qui est la leur, mais toute la dimension qui est la leur - et en même temps de placer l'humain à cette même mesure, dans sa réalité plutôt que dans les idées qu'il s'est forgées de lui-même, à travers religions et philosophies. L'animisme, comme dans une certaine mesure la vision du monde de Francesco d'Assisi², a tendance à vouloir placer l'animal ou la plante au niveau - présumé supérieur - de l'humain. Ici il s'agit plutôt de ramener l'humain à sa dimension d'Eucaryote, très complexe certes, mais pas du tout détaché des autres - de le mettre à sa juste place dans le tout.

Cela ne veut pas dire que l'humain ne mérite pas plus de respect que la plante. Il mérite, comme tout animal, un respect différent, et ce d'autant plus qu'il est capable de conscience de soi - comme bien d'autres animaux, d'ailleurs... Mais il reste partie du tout, il n'est pas à part du reste. Tout se tient. L'être humain dans son aveuglement dénie souvent toute dignité jusqu'à l'autre être humain - en général parce qu'il est autre, et que l'orgueil, l'égoïsme et le suprémacisme latent prévalent³. Mais en refusant la dignité à un autre humain, c'est à sa propre dignité que l'humain porte atteinte. Et en refusant de prendre en compte la souffrance ou le stress d'un animal, voire d'une plante⁴, c'est encore à sa propre dignité qu'il attente, c'est le mépris de sa

¹ J'ai eu la chance de rencontrer l'un de ces magnétiseurs qui m'a affirmé qu'il ne faisait absolument rien d'autre que de se tenir auprès du patient et d'étendre sa main au-dessus des parties brûlées jusqu'à ce que la sensation de chaleur ressentie dans sa paume disparaisse.

Les magnétiseurs honnêtes (non charlatanesques) recourant à divers rituels le font cependant pour la plupart... de bonne foi - simplement parce que la croyance populaire a lié ces phénomènes a priori incompréhensibles à des pratiques magiques ou religieuses.

Comme pour le langage des dauphins, il est cependant regrettable que les médecins qui ont recours à ces leveurs de feu, en principe nourris d'études scientifiques, n'aient jamais semble-t-il eu la curiosité d'installer à proximité d'eux des appareils de mesure pour tenter de comprendre ce qu'il se passe... s'il se passe quelque chose.

² Popularisée par le Cantique des Créatures (*Laudes Creaturarum*) ou Cantique de Frère Soleil (*Cantico di Frate Sole* en italien) et l'épisode du loup de Gubbio, il ne faut toutefois peut-être pas exagérer la propension de Francesco d'Assisi - saint François d'Assise - à considérer choses, plantes et animaux comme des frères et sœurs... Mais après que Giovanni di Fidenza - saint Bonaventure - eut écrit sa biographie (et fait tout son possible pour supprimer toutes les autres versions écrites auparavant), l'histoire de sa vie, déjà assez incertaine, a achevé de plonger dans la fable.

Sur le sujet, voir par exemple G. Miccoli, Les vies de saint François d'Assise, ds L'Histoire (magazine), 268, septembre 2022.

En ligne : <https://www.lhistoire.fr/les-vies-de-saint-fran%C3%A7ois-d-assise>

³ Dans une autre dimension, mais vraiment tout se tient, cela résonne aussi avec le texte de M. Niemöller "*Quand ils sont venus chercher...*"

⁴ Tant pis pour les végétariens, les végétaliens et autres végans - eux aussi sont cause de souffrance sur le vivant... même si, en en bon mammifère, on a forcément plus d'empathie pour la vache que pour le pissenlit qu'elle broute. Au demeurant, cela n'atténue pas sa capacité de stress, mais il faut dire que la plante coupée, ou

propre souffrance potentielle que l'humain autorise - oubliant dans son arrogance à quel point la vie est toujours incertaine, à quel point rien n'est jamais acquis, et surtout pas le si fragile bien-être¹...

A défaut de parvenir à se passer complètement de ressources carnées, ce qu'il faudrait déjà pour mettre en œuvre un vrai respect de l'animal, ce serait supprimer les usines à viande (véritables camps de concentration pour animaux, de même que les usines à lait ou les usines à œufs) - ainsi que les abattoirs qui leur servent de corollaires. A la place de ces derniers on pourrait envisager des abattages à la ferme réalisés par des services vétérinaires ambulants gérés par l'Etat et sévèrement contrôlés², pour éviter aux animaux le stress du trajet et du lieu imprégné de souffrance et de mort. On pourrait alors faire en sorte que dans le cadre coutumier des animaux (qui respecterait les besoins de ceux-ci, aussi bien en espace qu'en sociabilité) celle-ci soit douce, précédée d'une anesthésie générale qui leur éviterait souffrance et stress³, une mort qui serait, enfin... humaine - tel que l'humain en tout cas aime à se représenter - et que pourtant il se refuse en premier lieu à lui-même (euthanasie et suicide assisté) au nom de considérations philosophiques et surtout religieuses d'un autre temps. Tout se tient, vraiment. Et l'humanité tant chantée (et si peu mise en œuvre) se forge d'abord dans les comportements que les humains s'autorisent, et, surtout tout sans doute, ceux qu'ils se refusent.

On rejoint là une idée d'A. Camus qui, quoiqu'il ne l'ait pas développée, a été beaucoup commentée : « *Non, un homme ça s'empêche. Voilà ce que c'est un homme, ou sinon...* »⁴. Oui ça s'empêche - et ça s'interdit, surtout - de torturer, de tuer, de violer, de commettre des abus de toute sorte... Ça s'interdit de dénier toute dignité au reste du monde et de prendre en compte toute capacité de souffrance, qu'il s'agisse d'hommes ou d'animaux⁵ - et pourquoi pas, demain, quand on les connaîtra mieux, d'arbres et de plantes ?

l'arbre abattu - à l'exception de la plupart des résineux - conserve une chance de rejeter et de repousser, de se reconstituer, que n'a malheureusement pas l'animal tué ou grièvement blessé.

En fait végétarisme et végétalisme peuvent se comprendre en termes de rejet des usines à viande, d'usines à lait et d'usines à œufs. Même lorsque les élevages sont qualifiés de "bio", cela concerne en effet souvent davantage la qualité de l'alimentation des animaux (et son impact possible sur l'humain en fin de compte) que leurs conditions de vie et leur bien-être. Mais la philosophie végane se soucie-t-elle vraiment de souffrance ? Un peu comme les productions "bio" dont on vient de parler, elle peut paraître tournée davantage vers l'humain (dans sa représentation intellectuelle ou sociale cette fois) que vers l'animal et son bien-être.

¹ Ne parlons pas du bonheur, qui est avant tout un sentiment, un ressenti conscient, de ce bien-être.

² Pour prévenir les dérives de coût très souvent constatées dans la médecine vétérinaire "libérale", malheureusement la seule qui ait cours en France au détriment des propriétaires d'animaux, et bien sûr des animaux eux-mêmes.

³ Le coût serait peut-être plus élevé, mais les marges des grossistes en viande et des grands distributeurs le permettent. Il faudrait toutefois encore que l'Etat - qui s'en est désengagé au nom de la sacro-sainte loi du marché (qui garantit seulement le profit des plus puissants sur celui-ci) - retrouve son rôle de régulateur et de contrôleur des prix à tous les niveaux de la chaîne de production et de distribution.

De toute façon les circuits pourraient être alors beaucoup plus courts. Et on n'a pas besoin de manger de la viande tous les jours. Les œufs, et les champignons y suppléent aisément. En outre leur consommation ne provoque aucune souffrance : la cueillette d'un champignon, si elle respecte le mycélium, ne cause pas plus de dommage au mycète que la chute d'une pomme à un pommier. Quant à l'œuf, ce sont surtout les conditions d'élevage des poules qu'il faut prendre en compte : espace disponible, buissons et arbustes où s'abriter.

⁴ A. Camus (Le premier homme, Paris, Gallimard, 1994, p. 66).

Non seulement il n'a pas développé cette idée, mais elle était dans un texte mis de côté et publié des années après sa mort. Que l'on ne se méprenne pas toutefois sur le sens de cette remarque. Il ne s'agit pas de mettre en question la valeur de la pensée de Camus - soutenue par un génie rare, propre à certains auteurs, de susciter chez une majorité de lecteurs, avec leurs mots et l'agencement qu'ils leur donnent, un ressenti extrêmement vif.

⁵ En ce sens M. Ricard, La souffrance d'un animal est plus importante que le goût d'un aliment, ds Le Point, 21/11/2016.

En ligne : https://www.lepoint.fr/societe/matthieu-ricard-la-souffrance-d-un-animal-est-plus-importante-que-le-gout-d-un-aliment-21-11-2016-2084512_23.php

Mais on vient de le voir, il y a refus et refus. On ne peut pas mettre sur le même plan le refus de l'euthanasie ou du suicide assisté, et le refus généralisé de la souffrance du vivant sur notre planète. D'un côté on agit au nom de principes poussifs qui admettent par ailleurs comme une fatalité, sous couvert de réalisme politique, les violences étatiques de toutes sortes, depuis les guerres jusqu'à divers abus de pouvoir (et de confiance). Ceux-là couvrent encore d'un voile pudique tous les manquements, toutes les hypocrisies, commis au quotidien ici ou là sur la planète, jusque par des pays brandissant par ailleurs bien haut les grandes valeurs que l'on voudrait être celles de l'humanité... De l'autre côté on choisit d'essayer de respecter ces grandes valeurs - au premier rang desquelles la dignité et le respect du vivant - et de faire tout ce qui est en son possible pour se conformer à ce choix.

On criera à l'utopie. Mais l'humanité et la dignité de l'humain ont un prix, même si l'homme par facilité se refuse à le payer, et même à le considérer, tout en feignant de croire bien fort que cela n'a pas d'importance et ne l'avilit pas. C'est faux. Cela l'avilit - car on ne peut pas transiger avec certaines choses, on ne peut pas biaiser indéfiniment avec les principes d'humanité que l'on proclame, on ne peut pas considérer comme négligeable pour d'autres organismes sensibles¹ ce que l'on n'accepterait pas pour soi, sous prétexte qu'ils seraient "inférieurs". L'acquisition de capacités techniques supérieures à celle des autres animaux ne dispense en rien l'humain de s'acquitter de ses devoirs primordiaux de dignité et d'humanité - bien au contraire, elle augmente ceux-ci au *prorata* de la capacité acquise à réduire les souffrances autour de lui sur la planète.

La prise en compte de la souffrance, des souffrances, appelle encore une référence à la philosophie bouddhiste, dont le premier objet reste de supprimer celle-ci, au moins pour l'humain. Mais la philosophie seulement², car il ne faut pas oublier que la religion qui lui est associée a dans le passé déchaîné massacres et tueries³ - comme d'ailleurs toutes les religions, détentrices d'une autorité pouvant être détournée pour mener les peuples. On ne flirte pas impunément pendant des siècles avec le pouvoir.

Au fond, il n'y a sans doute qu'un grand principe. Comme le disaient déjà Confucius⁴ et le sage juif Hillel l'Ancien, Hillel Ha Zaken ou Hazaken⁵, repris par l'article 6 de la Constitution (française) de 1793⁶ : « *Ne fais pas à un autre ce que tu ne veux pas qu'il te soit fait* ».

¹ Sur cette notion d'organismes sensibles, voir encore M. Ricard, La souffrance d'un animal est plus importante que le goût d'un aliment, ds Le Point, 21/11/2016.

² Et une fois que l'on a dépouillé cette philosophie de nombreux concepts qui semblent viser avant tout à établir une stricte hiérarchie de maîtres-penseurs, à travers la compréhension (présumée) d'un savoir ésotérique - au demeurant de peu d'utilité comme tout ésotérisme.

Pour envisager une philosophie bouddhiste hors Bouddha (en tout cas hors bouddhisme institutionnel, car Gotama/Gautama y est présent, même s'il a la sagesse de l'indifférence, ou l'indifférence de la sagesse) on peut lire et relire le magnifique roman de H. Hesse, Siddhartha, paru en 1922. Il trace peut-être une limite - où finit la philosophie, où commence la religion... et à chacun sa voie !

³ Voir à ce titre A. David-Neel, Voyages et aventures de l'esprit, Paris, Albin Michel, 1994, pp. 94, 96, 98... et en particulier p. 94 : « *Massacres, pillages, destruction de monastères rivaux, ces soi-disant bouddhistes, à qui leur doctrine enjoint la bienveillance et la mansuétude, ne reculèrent devant aucun forfait, se comportant absolument de la même façon que les armées des soi-disant chrétiens à qui la pratique des mêmes vertus est tout aussi fortement prescrite.* »

⁴ Confucius, Entretiens, Chapitre XV, 23 : « *Tzeu koug demanda s'il existait un mot qu'on pût observer toute la vie. Le Maître répondit : "N'est-ce pas celui de tolérance ? Ne faites pas à autrui ce que vous ne voudriez pas qu'on vous fasse à vous-même".* »

En ligne : https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Entretiens_de_Confucius

⁵ Talmud de Babylone, Shabbat 31a : « *Ce que tu trouverais haïssable pour toi, ne le fais pas à autrui.* »

En ligne sur Sefaria.org (traduction de l'hébreu en anglais : « *which is hateful to you do not do to another.* ») <https://www.sefaria.org/Shabbat.31a.1?lang=bi&with=all&lang2=en>

⁶ Voir en ligne : <https://www.conseil-constitutionnel.fr/les-constitutions-dans-l-histoire/constitution-du-24-juin-1793>

Est-il besoin de l'écrire ? puisque l'action projetée a un effet sur autrui, ce principe fondamental recouvre notamment, chaque fois que la consultation est possible, le consentement de cet autre à l'action projetée (sans quoi, par simple réciprocité, n'importe qui est en droit de faire n'importe quoi à celui qui projette d'agir) - sauf évidemment dans le cas où cette action projetée est la réaction à une action de cet autre qui contrevient déjà au principe de base¹.

A l'énoncé de celui-ci le sage Hillel aurait même ajouté : « ... *le reste n'est que commentaire* ». D'un point de vue éthique, sans aucun doute, *tout* le reste.

1.2.3.4. Les lichens : en marge des mycètes, et à cheval sur les règnes.

Aujourd'hui en comptant les mycètes microscopiques, on estime que l'on a recensé moins de 10 % des espèces de mycètes qui peuplent notre planète (et peut-être même seulement 5 %)². Certains de ceux que nous connaissons offrent des perspectives extraordinaires pour dépolluer les sites industriels, remplacer les engrais chimiques, enrayer la désertification croissante des zones sahéliennes, dégrader des produits réputés non recyclables, voire traiter certaines maladies auto-immunes³. Ceux que nous ignorons pourraient nous permettre d'améliorer ces projets ou de découvrir de nouvelles voies à ce jour totalement inconnues. Depuis un milliard d'années peut-être, ils se sont adaptés à tous les milieux, ont réussi à s'y installer, et pour y parvenir ont surmonté à peu près tous les obstacles qu'ils ont pu rencontrer. Champions de la

¹ Puisque l'on est dans le Luberon, il faut rappeler que le marquis de Sade (seigneur de Lacoste) avait émis très brièvement dès 1791 une sorte d'objection anticipée au principe de l'article 6 de la Constitution de 1793.

Dans "Justine ou les malheurs de la vertu", son premier ouvrage publié, il a écrit en effet : « *Consultez-le, s'avouera-t-il cruel ? Il n'a rien fait qu'il n'endure lui-même* » (op. cit., Paris, France Loisirs, 1981, p. 126). L'argument bien sûr est spécieux, car il y a là, de manière évidente, violation du principe de consentement. Et cette objection se fonde en outre chez Sade sur le caractère masochiste de certains, qui ne concerne qu'eux et ne saurait en aucun cas leur donner un droit sur autrui.

² Il est très difficile d'estimer le nombre total d'espèces de mycètes. Leur nombre total pourrait être 10 à 20 fois plus élevé que celui des espèces connues (entre 70.000 et 150.000). Source : Wikipédia, Nouvelle espèce biologique.

En ligne : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nouvelle_esp%C3%A8ce_biologique

Sur une estimation, bien supérieure mais très incertaine, du nombre réel d'espèces, voir cependant M. Blackwell, *The Fungi*, 1, 2, 3 ... 5.1 million species ? ds *American Journal of Botany* 98, 3, mars 2011, pp. 426-438.

En ligne : <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3732/ajb.1000298>

En 2011 on connaissait 70.000 espèces de mycètes, nombre qui serait passé à 100.000 en 2015.

³ Sur tous ces thèmes, avec en outre un long passage sur le myxomycète *Physarum polycephalum* (aujourd'hui rangé parmi les amibes, et plus connu sous le nom de blob) on peut voir l'excellent documentaire d'A. Rizo, T. Sipp, *Les champignons pourront-ils sauver le monde ?* Arte France / Les films d'ici / CNRS images, 2013.

En ligne : https://boutique.arte.tv/detail/champignons_sauver_monde

Pour aller plus loin, M. Hafidi (dir.), *Congrès international sur les Mycorhizes*, 15-17 octobre 2014, Marrakech, Maroc, Université Cadi Ayyad, Marrakech (et Faculté des Sciences Semlalia, Faculté des Sciences et Techniques, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Institut de Recherche pour le Développement), notamment p. 23 (P. Bonfante, M. Giovannetti, M. Chialva, M. Novero, A. Salvioli, Sun X., V. Volpe, I. Zouari, *At the root of plant health, the role of arbuscular mycorrhizas*).

En ligne :

https://mafiadoc.com/download/the-mafiadocom_5c9dc77f097c47b5168b45a0.html

En particulier sur les perspectives de lutte contre la désertification au Sahel par les champignons mycorrhiziens à arbuscules (CMA) : O. A. Ba, *Diversité des champignons mycorrhiziens associés à des espèces ligneuses sauvages en milieu aride de Mauritanie et effet de l'inoculation sur *Z. lotus* et *A. tortilis* subsp *raddiana**, Mémoire de master en agroforesterie, écologie et adaptation, Université Cheikh Antar Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Biologie végétale, juin 2018, en particulier pp. 12-22 pour la présentation de ces champignons.

En ligne :

http://www.ebasouth.org/sites/default/files/attachments/MSc%20thesis_Mauritania_Mycorrhizal%20diversity.pdf

Pour des mycètes dégradant le kérosène, les agents chimiques tensio-actifs, les polyuréthanes, voir M. Locquin, *Mycologie générale et structurale*, p. 251.

symbiose (comme les bactéries) ils se sont également associés à tous les organismes qu'ils ont pu croiser et qui les toléraient.

Lorsque l'on parle de mycètes et d'origines, de sortie de la mer primitive, on ne peut manquer d'envisager les associations lichéniques. De fait la symbiose algue-mycète a donné très précocement naissance aux lichens¹ - et en premier lieu bien sûr à toutes les formes de

lichens aquatiques². Les associations lichéniques sont complexes. On a vu plus haut que dans 86-87 % des cas, on trouve une association algue-mycète - en fait une (ou plusieurs) algue(s) associée(s) à un (ou plusieurs) mycète(s) - dans 10 % des cas une association cyanobactérie-mycète, et dans 3-4 % des cas, une association des 3 types de partenaires³. Depuis quelques années on a également découvert d'autres partenaires potentiels, en plus de ceux-ci : des protistes⁴, voire des virus... Toutefois comme l'indiquent les chiffres ci-dessus, la forme la plus courante, sinon la plus simple, demeure l'association algue-mycète. Celle-ci peut être plus ou moins complète. Il existe des lichens dits lâches, non parce qu'ils manquent de courage pour conquérir les milieux hostiles mais parce que leurs deux composantes peuvent vivre séparément⁵. Dans tous les cas, tous deux y trouvent leur compte : l'algue apporte sa capacité à fabriquer des sucres, que le mycète ne peut pas synthétiser, et dont il a besoin. Et le mycète apporte sa capacité à résister à la sécheresse, que l'algue supporte très mal. Le mycète a souvent l'avantage⁶. Mais la chimère ainsi créée est un succès. Elle peut vivre à peu près partout, du milieu marin (rochers du littoral, coquilles de mollusques, algues) jusqu'à la haute montagne en passant par les déserts les plus arides. Les communautés de lichens sont même les formes de vie dominantes dans les milieux polaires et circumpolaires. Capable de décomposer superficiellement la roche par sécrétion d'acide lichénique, les lichens peuvent s'installer là où aucun autre organisme ne peut le faire, et de préparer ainsi le terrain aux Bryophytes (mousses, hépatiques) et aux plantes vasculaires, dites supérieures. Leur longévité enfin peut atteindre

¹ La symbiose lichénique peut aussi impliquer des cyanobactéries.

Globalement, dans 86-87 % des cas, on trouve une (ou des) algue(s) associée(s) à un ou plusieurs mycètes, dans 10 % des cas, une cyanobactérie associée à un mycète - et dans 3-4 % des cas, une association des 3 types de partenaires.

Depuis quelques années on a découvert la possibilité d'autres partenaires en plus de ceux-ci : des levures (autres mycètes), des protistes (micro-organismes eucaryotes à organisation cellulaire simple, autres qu'un animal, un mycète ou une plante, par exemple une amibe), voire virus...

Sur la répartition citée : F. Högnabba, S. Stenroos, A. Thell, L. Myllys, Evolution of cyanobacterial symbioses in Ascomycota, ds A. Aptroot, M. R. D Seaward, L. B Sparrius (dir.), Biodiversity and Ecology of Lichens Liber Amicorum Harrie Sipman, Bibliotheca Lichenologica, 99, Berlin, Cramer, 2009, pp. 163-184.

En ligne (résumé) : <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/evolution-of-cyanobacterial-symbioses-in-ascomycota>

² Alors que c'est le mycète qui fournit ordinairement la structure externe du lichen (notamment pour protéger l'algue lors des périodes de sécheresse) pour les lichens aquatiques c'est généralement l'algue qui procure l'enveloppe externe.

Il n'est pas exclu toutefois qu'il existe des lichens aquatiques, voire marins, à structure externe produite par des mycètes aquatiques. Simplement il s'agit toujours de lichens incrustés sur les roches (on les dit crustacés) et dans l'eau ils sont très difficiles à distinguer de celles-ci.

³ F. Högnabba, S. Stenroos, A. Thell, L. Myllys, Evolution of cyanobacterial symbioses in Ascomycota, ds A. Aptroot, M. R. D Seaward, L. B Sparrius (dir.), Biodiversity and Ecology of Lichens Liber Amicorum Harrie Sipman, Bibliotheca Lichenologica, 99, Berlin, Cramer, 2009, pp. 163-184.

En ligne (résumé) : <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/evolution-of-cyanobacterial-symbioses-in-ascomycota>

⁴ Il s'agit de micro-organismes eucaryotes à organisation cellulaire simple, autres qu'un animal, un mycète ou une plante - par exemple, une amibe.

⁵ M. Locquin, Mycologie générale et structurale, p. 258.

⁶ M. Locquin, Mycologie générale et structurale, p. 257.

plusieurs milliers d'années dans le cas de *Rhizocarpon geographicum*¹, un joli lichen vert jaunâtre sur fond noir que l'on rencontre assez couramment sur les rochers du Luberon.

Les lichens sont souvent assez peu pris en compte. Mais c'est un tort. Pour la plupart très sensibles à la pollution, ils peuvent servir d'indicateurs de celle-ci. Et ils ont pu revêtir une grande importance pour nos ancêtres préhistoriques, car certaines espèces sont comestibles². C'est à des lichens que l'on a associé la manne céleste citée à la fois par la Bible et le Coran (reprenant l'histoire des Hébreux dans le désert). Il s'agirait de *Lecanora esculenta* ou encore d'*Aspicilia esculenta* qui aurait été signalée en Andalousie (région de Saragosse) par le géographe et botaniste arabe Al Idrissi dans un traité qu'il a réalisé pour le roi Roger de Sicile au milieu du XIIe siècle³...

1.2.3.5. Et pour finir, une amibe que l'on avait prise pour un mycète !

Nous n'en avons pas terminé avec les organismes proches des mycètes. C'est en effet parmi eux, avant qu'on le reclasse avec toute sa famille dans un autre règne, que l'on a identifié un organisme qui, bien qu'il se présente un peu comme un serpent de mer⁴, semble offrir une série de perspectives passionnantes. C'est le *Physarum polycephalum* - "blob" de son nom médiatique tiré d'une créature d'un film de science-fiction⁵.

Du temps où on le classait parmi les mycètes, c'était déjà un élément singulier : il est en effet capable de se déplacer (de quelques centimètres) sur le sol où les branches mortes qu'il colonise.

¹ A l'est de l'île de Baffin, au Canada, un spécimen a été crédité en 1972 de 9500 ans, mais on ne peut dater les lichens que par leur croissance, et celle-ci est assez irrégulière (comme celle des arbres, étudiée par la dendrochronologie) : voir S. Rosenwinkel, O. Korup, A. Landgraf, A. Dzhumabaeva, Limits to lichenometry, ds Quaternary Science Review, 129, 1, 2015, pp. 229-238.

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379115301529>

² Pendant "l'âge du renne" on pense bien sûr à *Cladonia rangiferina*, le lichen des rennes, mais aussi à diverses usnées. C'est plutôt en Asie et en Amérique du Nord que les lichens sont consommés traditionnellement - en Europe cela se limite à la Scandinavie et à quelques vallées des Alpes. Il faut toujours les débarrasser de leur acide lichénique (qui les rend indigestes et très amers) : leur préparation réclame donc des séquences répétées de trempage avant qu'ils soient bouillis, ou bien plusieurs passages en eau bouillante (en jetant les premières eaux, bien sûr).

³ A. Bolay, Les champignons et l'alimentation humaine, ds Bulletin du Cercle vaudois de botanique, 12, 1967, p. 47-53, ici pp. 49-51.

En ligne : <http://doc.rero.ch/record/27532/files/12-13.pdf>

Sur le traité d'Al Idrissi, voir Diyarbakir's heavenly bread and other manna of things, Case Studies, ds Information about Australia's Flora, Australian Lichens, Sponsored by the Friends of the Australian National Botanic Gardens, En ligne : <https://www.anbg.gov.au/lichen/case-studies/diyarbakir-manna.html>.

⁴ Pour le moment, peu de publications scientifiques se sont intéressées à cet organisme qui fait surtout le bonheur des journaux grand public.

On peut toutefois signaler :

T. Nakagaki, H. Yamada, A. Tóth, Maze-solving by an amoeboid organism, ds Nature, 407, septembre 2000, p. 470.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/35035159>

D. Vogel, A. Dussutour, Direct transfer of learned behaviour via cell fusion in non-neural organisms, ds Proceedings of the Royal Society B, Biological Science, 283, 28 décembre 2016.

En ligne : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2016.2382>

A. Dussutour, D. Vogel, V. Etienne, Le "blob", capable d'apprendre... et de transmettre ses apprentissages, Communiqué de presse C.N.R.S., 21 décembre 2016.

En ligne : <http://www.cnrs.fr/fr/le-blob-capable-dapprendre-et-de-transmettre-ses-apprentissages>

M. Florin, Le blob, nouvelle star du zoo de Paris, ds C.N.R.S., Le journal, 14.10.2019 (interview d'A. Dussutour, attention toutefois à l'anthropisation).

En ligne : <https://lejournel.cnrs.fr/articles/le-blob-nouvelle-star-du-zoo-de-paris>

⁵ *The Blob* (en français *Danger planétaire*), film de I. S. Yeaworth jr, produit par J. H. Harris, avec S. McQueen, Paramount Pictures, 1958.

Grand en moyenne d'une dizaine de centimètres, *Physarum polycephalum* pourrait croître, parfois très rapidement, jusqu'à occuper 10 mètres carrés.

Mais bien qu'il offre l'aspect d'un foisonnement de fines ramifications attachées ensemble¹ - on a découvert ces dernières années qu'il s'agissait d'un organisme unicellulaire. On l'a donc reclassé avec toute sa famille (les myxomycètes)² parmi les amibes - tout en notant des différences conséquentes : d'abord les myxomycètes peuvent être de grande taille (tandis que les amibes sont généralement minuscules) et ensuite ils produisent des spores (alors que les amibes se reproduisent par division cellulaire). Ce classement n'est donc peut-être pas définitif...

Comme les mycètes, *Physarum polycephalum* est susceptible d'entrer en dormance si les conditions lui sont défavorables. Il prend alors la forme d'un sclérote - une structure rigide, desséchée, qui ressemble à un très mince lichen ou au limbe d'une feuille à demi-décomposée. Mais il a la faculté de mettre à profit cette dormance pour se régénérer. Elle lui est donc utile, et même nécessaire. Il serait capable en outre - quoique bien sûr dépourvu de cerveau - d'apprendre, de transmettre son apprentissage à un congénère en fusionnant avec lui, et même de conserver ces acquis pendant sa dormance. Ces phénomènes n'ont pas encore été expliqués. Ils pourraient être liés à des substances qu'il secrète, susceptibles de résister à la dessiccation, qui structureraient son organisation corporelle - la forme qui lui permettrait de profiter au mieux des ressources de son environnement. Cette organisation durerait tant que les ressources auxquelles il a accès ne lui imposeraient pas une forme différente, plus performante, pour les atteindre. Mais il pourrait rester des traces des substances structurantes, qui conserveraient en quelque sorte une empreinte des formes précédentes (au moins des dernières ou de la dernière). Pour atteindre en tout cas ses ressources alimentaires (des bactéries, que l'on nourrit en laboratoire de flocons d'avoine) *Physarum polycephalum* est capable de s'étendre assez rapidement dans toutes les directions, d'explorer toutes les voies, puis de privilégier les plus directes vers les zones les plus riches - de s'étirer et de se renforcer en fait dans les directions où il trouve le plus à se nourrir. C'est là qu'interviennent peut-être les substances évoquées ci-dessus. Ce faisant toutefois, il détermine, là encore automatiquement, quasi-mécaniquement, les meilleurs cheminements pour relier entre eux les divers gisements de nourriture qui l'environnent - et surtout les plus riches.

Si l'on dispose donc sur la carte d'une région de la nourriture aux points correspondant à des villes, et que l'on installe des obstacles à des points correspondant à des reliefs naturels, *Physarum polycephalum* se révèle capable en s'organisant et se distribuant dans cet espace de tracer les meilleurs cheminements pour un réseau routier ou ferroviaire, très comparables à ce que la technicité humaine a pu réaliser³.

L'espèce (*Physarum polycephalum*) a été créditée de 500 millions, voire un milliard d'années⁴ - ce qui demeure assez imprécis, et reflète notre absence de données sérieuses sur le sujet. Elle se rencontre un peu sur tous les continents et présente apparemment des capacités différentes

¹ Son aspect varie des nervures qui restent du limbe d'une feuille à demi-décomposée (quand il est très fin) à une mince éponge animale miniature, mais avec des terminaisons hérissées (quand il est un peu plus épais).

² On en aurait déjà répertorié un millier, et ils seraient dix fois plus nombreux : M. Florin, Le blob, nouvelle star du zoo de Paris, ds C.N.R.S., Le journal, 14.10.2019 (interview d'A. Dussutour).

Il y aurait toutefois une grande diversité de formes, et probablement des capacités bien différentes d'une espèce à l'autre. A. Dussutour a indiqué qu'il peut y avoir autant de différences entre deux espèces de myxomycètes qu'entre un rongeur et une baleine chez les mammifères.

³ Sur ce thème voir par exemple P. Bertrand, Étonnante expérience : Tokyo modélisé dans une boîte de Petri, ds Le blob, l'extra-média (une édition de la Cité des sciences et de l'industrie et du Palais de la découverte) 29/01/2010.

En ligne : <https://leblob.fr/archives/etonnante-experience-tokyo-modelise-dans-une-boite-de-petri>

On peut voir aussi le très bon documentaire d'A. Rizzo, T. Sipp, Les champignons pourront-ils sauver le monde ? Arte France/Les films d'ici/CNRS Images, 2013 (52 mn).

⁴ M. Florin, Le blob, nouvelle star du zoo de Paris, ds C.N.R.S., Le journal, 14.10.2019 (interview d'A. Dussutour).

selon son origine géographique¹, ce qui paraît indiquer des séparations très anciennes conjuguées à des "apprentissages" parfois très récents.

Physarum polycephalum est par ailleurs très proche de *Badhamia utricularis* (la badhamie en forme d'outre) avec laquelle une confusion est possible².

Pour ma part je n'en ai jamais vu dans le Luberon ni dans la montagne de Lure. Mais on peut rencontrer assez couramment, à la forêt des Cèdres, ou sur le versant sud de Lure, un autre membre de la famille, *Fuligo septica*³. Il se présente sous l'aspect d'une masse informe mais structurée par un réseau rappelant un peu celui d'une éponge animale, à surface grenue ou hérissée, d'un beau jaune brillant (couleur RAL 1026) ou jaune zinc (RAL 1018), voire jaune soufre (RAL 1016) ou verdâtre (RAL 6039) lorsqu'il croît sur de la mousse. Il possède les mêmes capacités de déplacement que *Physarum polycephalum*⁴... A observer et photographier toutefois sans toucher, car il est plus fragile que son cousin. Il risque de se dessécher très rapidement si on le bouscule ou si on essaie de le prélever, et il ne possède pas forcément les mêmes capacités de dormance et de régénération.

1.3. LA FORMATION DU LUBERON : UNE LONGUE HISTOIRE.

1.3.1. Un Luberon de vase et de sables.

1.3.1.1. Avant le Luberon.

Au milieu du Permien (qui court entre -300 et -250 Ma), une bonne partie de la Provence est sous la mer. Toutefois quelques terres basses émergent dans le Var. C'est vers elles que nous allons trouver les premières traces régionales de vertébrés terrestres à respiration aérienne. Mais des traces de quoi ?

A cette époque se rencontrent parmi ces vertébrés deux grands groupes d'animaux. D'une part on trouve les thérapside ou thérapsidés⁵, dominants, qui comptent dans leurs rangs (avec les cynodontes de la fin du Permien) les ancêtres des mammifères. D'autre part on rencontre les diapsides ou diapsidés, parmi lesquels certains archosaures (de la fin du Permien également) vont plus tard donner le jour aux ptérosaures, aux dinosaures et aux oiseaux⁶.

¹ M. Florin, Le blob, nouvelle star du zoo de Paris, ds C.N.R.S., Le journal, 14.10.2019 (interview d'A. Dussutour).

Des tests ont été réalisés sur des spécimens de *Physarum polycephalum* originaires du Japon, d'Australie et des Etats-Unis, avec des résultats différents selon l'origine.

² Docanski Concept, Guide des champignons d'Europe occidentale (mycorance), badhamie en outre, *Badhamia utricularis*.

En ligne : <http://mycorance.free.fr/valchamp/champi617.htm>

³ Sur ce mycète voir par exemple Docanski Concept, Guide des champignons d'Europe occidentale (mycorance), fleur de tan, *Fuligo septica*.

En ligne : <http://mycorance.free.fr/valchamp/champi317.htm>

Il ne faut pas le confondre avec la trémelle mésentérique (*Tremella mesenterica*) qui est organisée en lobes et présente une surface lisse. En ligne : <http://mycorance.free.fr/valchamp/champi136.htm>

⁴ Comme *Physarum polycephalum*, *Fuligo septica* correspond à une cellule unique formée d'un plasmode, masse molle et déformable dans laquelle le noyau s'est divisé de nombreuses fois sans qu'il y ait eu de cloisonnement. N'ayant rien de rigide, et n'étant pas fixé, ce plasmode peut être animé de mouvements dus notamment à sa croissance et au substrat sur lequel celle-ci s'effectue. C'est ce qui lui permet de se déplacer (ou de glisser) de quelques centimètres par heure. En fait, il se déplace dans sa "peau" qui suit le mouvement.

⁵ La tendance actuelle serait à l'emploi du terme de thérapside, mais on trouve encore le terme de thérapsidés, par exemple dans un article (anonyme) d'éthologie mis en ligne en mars 2020 par l'université de Genève :

<http://ethologie.unige.ch/etho4.19/par.date/2020.03.11.htm>

⁶ Pour l'apparition des archosaures, voir M. Benton, Le règne des reptiles, Paris, Edimages, 1990, pp. 65 et 71.

Mais auparavant, il faudra survivre, encore une fois - et survivre à l'une des plus terribles extinctions de masse que la Terre ait connu : celle de la fin du Permien (dite aussi du Permien-Trias) survenue entre -260 et -250 Ma environ. A l'origine de celle-ci il y a peut-être eu l'impact d'une ou plusieurs météorites géantes en Asie (en Sibérie, et peut-être aussi en Chine). Cet impact (ou cette série d'impacts) aurait déclenché de gigantesques éruptions volcaniques qui auraient ravagé la terre et profondément affecté le climat. On estime en général que cette extinction massive a éliminé à peu près 95 % des espèces marines, et 70 % des espèces terrestres (animaux et végétaux)¹.

L'évènement de la fin du Permien a notamment imposé un coup d'arrêt au groupe des thérapsidés, même si certaines lignées ont survécu. Ces thérapsidés forment un ensemble très touffu, au moins autant que celui des dinosaures et de leurs ancêtres diapsidés - dont certains, les archosaures, apparus à la fin du Permien, ont survécu à la grande extinction, ce qui a permis à leurs descendants de régner sur la Terre.

Dominant ces diapsidés avant cette grande extinction, et riches comme eux de centaines et de centaines de genres et d'espèces, les thérapsidés ont parcouru la Terre entre - 270 et -220 Ma, à cheval donc sur l'extinction de la fin du Permien. Mais seules quelques lignées ont survécu, parmi lesquelles des cynodontes ou proto-mammifères. On appelait d'ailleurs jadis les thérapsidés "reptiles mammaliens". A tort, car c'étaient pour certaines lignées de bien drôles de reptiles. Il y a peu, on croyait en effet que c'était à la faveur du repeuplement qui a suivi l'extinction du Permien que certains animaux, notamment les ancêtres des mammifères et ceux des dinosaures, avaient acquis l'endothermie (capacité de produire leur chaleur corporelle) et l'homéothermie (capacité de la maintenir constante)². Une étude de 2018 a cependant fait table rase de cette hypothèse³. Elle a montré que certains thérapsidés possédaient déjà ces deux qualités entre -270 et -250 Ma. On a même envisagé que c'est l'endothermie et l'homéothermie qui auraient permis à certaines lignées de thérapsidés et de diapsidés (notamment à certains cynodontes et archosaures primitifs) de survivre. Après la grande extinction, on rencontre ainsi au début du Trias *Thrinaxodon*, un cynodonte⁴ de la taille d'un renard qui avait très vraisemblablement des poils, puisqu'il semble avoir eu des moustaches⁵. Et on peut envisager que si certains cynodontes s'étaient dotés de poils, certains archosaures pour leur part avaient pu se doter de plumes... La conséquence première de l'extinction de la fin du Permien, avec le repeuplement qui lui a succédé, et à terme le règne des dinosaures, c'est donc peut-être la victoire de la plume sur le poil. Victoire provisoire, certes, mais qui allait quand même durer... plus de 180 Ma.

En tout cas, au temps des dinosaures, l'endothermie et l'homéothermie étaient acquises de longue date par certaines lignées animales. R.T. Bakker a clairement démontré, le premier, que les dinosaures étaient des animaux à sang chaud, notamment en comparant la durée de vie d'un genre ou d'une espèce de dinosaure avec celle d'un genre ou d'une espèce ectotherme (reptile)

¹ Si on est passionné par le sujet, même si finalement on ne sait pas grand-chose, on peut voir M. Benton, *When Life Nearly Died : The Greatest Mass Extinction of All Time*, Londres, Thames & Hudson, 2005.

² J. Leyes, L'origine des plumes repoussée de 70 millions d'années, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 21.12.2018. En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/les-plumes-existaient-deja-il-y-a-250-millions-d-annees_130369

³ K. Rey, R. Amiot, F. Fourel, F. Abdala, F. Fulteau, N.-E. Jalil, L. Jun, B. S. Rubidge, R. M. H. Smith, Oxygen isotopes suggest elevated thermometabolism within multiple Permo-Triassic therapsid clades, ds *eLife*, 6, 18 juillet 2017, 28589.

En ligne : <https://elifesciences.org/articles/28589>

Compte-rendu en français : L. Peillon-Comby, K. Rey, C. Lécuyer, Nos ancêtres ont eu le sang chaud juste avant l'extinction du Permien-Trias, C.N.R.S., Communiqué de presse national, Paris, 18 juillet, 2017.

En ligne : <http://www.cnrs.fr/fr/nos-ancetres-ont-eu-le-sang-chaud-juste-avant-lextinction-du-permien-trias>

⁴ A l'intérieur du groupe des thérapsidés, les cynodontes sont considérés comme les ancêtres des mammifères.

⁵ M. Benton, *Le règne des reptiles*, Edimages, 1990, p. 68.

d'autre part, et d'un genre ou d'une espèce endotherme (mammifère) d'autre part¹. Avant même l'étude de 2018 citée plus haut, le nombre d'espèces de thérapsidés connues (de même que le nombre d'espèces d'archosaures) pouvait déjà fortement suggérer qu'il en était ainsi pour une bonne partie de leurs représentants².

On n'a malheureusement pas trouvé en Provence de restes de thérapsidés, ni d'archosaures. Mais on a pu deviner leur présence³. Car si l'on n'a pas d'ossements, on a des traces - des empreintes laissées dans la vase ou le sable, encore meubles, qui sont devenus à présent des roches calcaires ou des grès. Les plus anciennes de ces traces datent du Permien supérieur (-270 à -250 Ma). Au sud de la Seyne-sur-Mer, il s'agit d'animaux de taille petite ou moyenne, dotés de quatre ou cinq doigts, qui n'ont pu être rattachées à aucune espèce connue⁴.

Après le Permien qui prend fin vers -252 ou -250 Ma, la durée octroyée au Trias inférieur est très brève, de l'ordre de 5 Ma environ. C'est donc au début du Trias moyen (pendant l'Anisien, entre -245 et -240 Ma environ) que l'on trouve d'autres empreintes. Déposées au cap du Baou Rouge, près de Sanary, dans des sables devenus aujourd'hui des grès, elles ont été attribuées à *Cheirotherium* (ou *Chirotherium*)⁵. Certains l'ont considéré comme un ancêtre possible des dinosaures - un archosaure⁶ - mais cela reste assez incertain. Comme quelques-uns des vertébrés dont les traces ont été retrouvées à la Seyne, il avait en effet la particularité de posséder cinq doigts disposés un peu comme ceux d'un singe (ou d'un ours) ce qui confère aux traces un aspect assez moderne⁷. Plus récemment, on aurait trouvé d'autres traces de *Chirotherium* dans le Var, malheureusement pas très bien localisées dans l'article qui les a évoquées⁸. A peu de distance des traces de *Chirotherium*, dans les calcaires coquilliers de l'anse de Port-Issol, toujours à Sanary, on a signalé quelques empreintes à quatre doigts (non attribuées) dans un niveau du Trias moyen daté de -245 à -235 Ma⁹. Au nord de l'anse de Port-Issol, une longue ligne de falaises se termine à l'est par des bancs de roche du Rhétien (dernier étage du Trias, entre -208 et 200 Ma environ). En 1965, P. Ellenberger y a signalé de très belles empreintes isolées, cette fois-ci de dinosaures bipèdes. Il les a rapprochées du genre *Eubrontes* - qui ne désigne pas une espèce animale, mais un type d'empreintes (d'une longueur de 25 à 50 cm, trois doigts, griffes

¹ R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, pp. 387-393, spécialement p. 391.

² Même si l'on peut conserver le terme de dinosaures, cela devrait donc mettre fin à leur classement parmi les reptiles. Malheureusement, comme on le verra, la tradition est trop bien implantée et on continue de perpétuer ce qui est visiblement, pour la plupart sinon la totalité d'entre eux, une erreur fondamentale.

³ G. Demathieu, G. Gand, N. Toutin-Morin, La palichnofaune des bassins permien provençaux, ds *Geobios*, 25, 1, 1992, pp. 19-54, ici p. 19 (résumé) : « *L'étude paléontologique montre la présence d'Eosuchiens, de Captorhinomorphes ou de Procolophonoidés, de Pélycosauriens et, peut-être, de Thérapsidés, vivant dans des environnements de plaine d'inondation, de lacs ou de marécages.* »

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016699509900365>

⁴ P. Ellenberger, Découverte de pistes de vertébrés dans le Permien, le Trias et le Lias inférieur, aux abords de Toulon (Var) et d'Anduze (Gard). ds *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 260, 5, mai 1965. pp. 5856-5860, ici p. 5856.

En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k4020b?rk=257512;0>

⁵ P. Ellenberger, Découverte de pistes de vertébrés dans le Permien, le Trias et le Lias inférieur, aux abords de Toulon (Var) et d'Anduze (Gard). ds *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 260, 5, mai 1965. pp. 5856-5860, ici p. 5856.

En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k4020b?rk=257512;0>

⁶ M. Benton, Le règne des reptiles, p. 80.

⁷ Photo d'une empreinte : <https://www.sciencephoto.com/media/547130/view/cheirotherium-reptile-footprint-fossil>

Voir aussi M. Benton, Le règne des reptiles, p. 80.

⁸ G. Gand, G. Demathieu, C. Montenat, Les traces de pas d'amphibiens, de dinosaures et autres reptiles du mésozoïque français, inventaire et interprétations, ds *Palaeovertebrata*, Montpellier, 35, 1-4, 2007, pp. 1-149, ici p. 32.

En ligne : https://palaeovertebrata.com/Articles/sendFile/8/published_article

⁹ P. Ellenberger, Découverte de pistes de vertébrés dans le Permien, le Trias et le Lias inférieur, aux abords de Toulon (Var) et d'Anduze (Gard), p. 5856 (niveau du Werfénien).

bien marquées) associé à des dinosaures théropodes de 3 à 8 m de long. Cela pourrait traduire la présence précoce de grandes espèces dans cette lignée, dont on ne sait rien pour le moment. Le premier des grands théropodes américains connus, *Lythronax argestes*, 8 mètres de long pour un poids de 2,5 tonnes¹, ne se place en effet qu'entre -84 et -70 Ma - soit quand même 125 à 130 Ma plus tard... Enfin, toujours à Sanary mais un peu plus à l'ouest, dans les falaises dolomitiques de la Cride, sur des dalles renversées à très fort pendage, portant parfois des *ripple-marks* ou des *mud-cracks*², P. Ellenberger encore a signalé des séries d'empreintes (70 sur une dalle, 95 sur l'autre) plus ou moins nettes appartenant à des dinosaures bipèdes, à trois doigts, *a minima* de deux ou trois espèces distinctes. Il les a datées de l'Hettangien, autour de -200 Ma. En 2007, sur croquis réalisé en 1965, certaines ont été attribuées à *Eubrontes* encore, ou à *Grallator*³ (un autre type d'empreintes correspondant peut-être cette fois à un dinosaure herbivore de 3 ou 4 m de long) - ce qui, compte tenu des précautions employées pour leur définition, et de l'imprécision du type, ne nous avance finalement pas beaucoup...

1.3.1.2. Le matériau d'une montagne.

C'est entre 60 et 130 millions d'années plus tard, au Secondaire, et plus précisément au Crétacé inférieur, entre -145 et -125 millions d'années environ (plus de 200 millions d'années après l'*Acanthostega* décrit plus haut, et au moins 30 millions d'années après l'apparition des premières plantes à fleur (avec *Nanjinganthus dendrostyla*) qu'il faut placer l'origine des épais bancs de calcaire gris ou blanc qui fournissent la masse principale du Luberon. La matière s'est déposée en deux temps.

Au Crétacé inférieur, pendant le Néocomien (-145 à -130 Ma) des sédiments ont été arrachés aux continents proches. Il y en avait un à la place de la Méditerranée actuelle, et un autre à la place du Massif Central. Ces sédiments se sont déposés au fond d'une mer profonde qui occupait l'emplacement du Luberon actuel. Avec le temps, ils ont donné les marnes et les calcaires relativement tendres qui constituent aujourd'hui la matière principale du grand Luberon. La masse de ces sédiments était énorme. L'épaisseur des bancs de calcaire qu'ils ont formés oscille fréquemment entre 300 et 600 mètres, mais un forage dans le petit Luberon a atteint plus de 2 600 mètres sans sortir des roches du Néocomien⁴.

¹ M. A. Loewen, R. B. Irmis, J. J. W. Sertich, P. J. Currie, S. D. Sampson, Tyrant Dinosaur Evolution Tracks the Rise and Fall of Late Cretaceous Oceans, ds PLoS ONE, novembre 2013.

En ligne : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0079420>

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, King of Gore : voici l'arrière-grand-père du T. rex, ds Sciences et Avenir en ligne, 07.11.2013 (08.11.2013)

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/on-a-decouvert-l-arriere-grand-pere-du-t-rex_21572

Les Tyrannosaures pour leur part sont apparus vers -70 Ma et ont duré jusqu'à l'extinction des dinosaures vers -66 Ma.

² Les *ripple-marks* apparaissent sur des grès issus de sables déposés en eaux peu profondes. Il s'agit en effet de marques, généralement ondulées et plus ou moins parallèles, que des vaguelettes ont imprimées sur le sable du fond qu'elles ont remué.

Les *mud-cracks*, de formes polygonales, sont des fentes de dessiccation fossilisées.

Sur ces phénomènes, voir par exemple H. Zim, P. Shaffer, Roches et minéraux, Paris, Deux Coqs d'Or Editeur (collection Le petit guide), 1966, pp. 123 et 125.

³ G. Gand, G. Demathieu, C. Montenat, Les traces de pas d'amphibiens, de dinosaures et autres reptiles du mésozoïque français, inventaire et interprétations, p. 34.

⁴ Carte géologique à 1/50 000, Cavaillon, XXXI-42, Orléans, (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) B.R.G.M., 1966 (1974), Notice explicative, p. 1.

En ligne : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0967N.pdf>

Sur la genèse du Luberon, et ses particularismes géologiques, on peut voir également C. Balme, G. Clauzon, M. Denis, M. Dubar, P. Gigot, J.-L. Guendon, S. Legal, M. Liouville, J.-P. Masse, L. Moutier, J. Nicod, D. Nury, M. Philippe, E. Salesse, J.-M. Triat, Découverte géologique du Luberon, Paris/Apt, BRGM/Parc naturel régional du Luberon, 1998, pp. 14-21.

Ultérieurement, pendant l'Urgonien et spécialement la première partie de celui-ci (appelée Barrémien, entre -130 et -125 Ma) les mouvements de l'écorce terrestre ont fait remonter puis peut-être redescendre légèrement le fond de la mer crétacée - en tout cas au niveau de ce qui deviendrait un jour le petit Luberon. Du fait de la dérive des plaques tectoniques, la région se trouvait alors globalement au niveau des tropiques. Comme dans toutes les mers chaudes et peu profondes, des formations récifales se sont développées. Ce sont elles qui ont fourni la matière des roches blanches et dures du petit Luberon. En raison probablement de divers mouvements de l'écorce terrestre, remontée puis légères replongées, cette matière qui a recouvert les sédiments du Néocomien peut atteindre une épaisseur de 300 mètres¹.

Ces mers du Crétacé inférieur (Néocomien, Urgonien) abritaient des ammonites en très grand nombre. Après que les futurs calcaires gris ou blancs se furent déposés au fond, autour de -125 à -113 millions d'années, la diversité locale de ces ammonites définit un étage géologique baptisé Aptien, à l'intérieur duquel prend place un Gargasien - nommés bien sûr d'après Apt et Gargas². En grand nombre aussi, mais moins significatives car moins typées, on trouvait encore des bélemnites, que l'on appelle localement "balles de fusil" - en fait des os de seiche fossilisés... Il y avait aussi des coraux, des échinodermes (on peut trouver de gros oursins dans la roche des carrières de Ménerbes) et divers autres animaux marins.

Parmi ces derniers, le plus spectaculaire demeure sans aucun doute un plésiosaure dont on a retrouvé les restes au-dessus de Peypin-d'Aigues, presque au sommet du Luberon³, dans une roche de l'Hauterivien, le dernier niveau du Néocomien daté de -133 Ma à -130 Ma. Les plésiosaures pouvaient atteindre 7 à 17 mètres de long. Bien que l'on n'ait retrouvé à Peypin-d'Aigues que cinq vertèbres, et quelques os provenant de ses membres, il semble que le plésiosaure de la mer du Luberon était de taille moyenne⁴. Les plésiosaures étaient des animaux au corps fusiforme, au cou allongé, aux quatre membres remplacés par des nageoires, à la queue relativement courte et trapue. Nageurs rapides, c'étaient sans aucun doute des prédateurs redoutables. On les classe parmi les reptiles marins principalement parce que leurs membres sont attachés de chaque côté du corps et non sous celui-ci. Mais les pinnipèdes, les phocidés ou les cétacés, bien qu'ils soient des mammifères, ont les membres placés quand même assez latéralement par rapport à leur corps - ce qui témoigne d'une adaptation qu'il n'y aurait a priori aucune raison de refuser aux plésiosaures. En outre la vie d'un grand animal marin à sang froid (ectotherme) aurait été assez contraignante, même dans des mers chaudes. De nos jours, qu'ils soient sur les rives ou bien qu'ils se laissent flotter à la surface de l'eau, les crocodiles passent des heures à se "soleiller" avant de saisir brutalement leurs proies. L'ectothermie aurait donc imposé aux plésiosaures ou aux mosasaures de vivre relativement près des rivages pour pouvoir réchauffer suffisamment leur corps pour se lancer à la chasse. Or certains de ces grands animaux

¹ Carte géologique à 1/50 000, Cavaillon, XXXI-42, Notice explicative, p. 9.

² Sur le sujet, on peut lire le travail impressionnant d'Y. Dutour, du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence :

Y. Dutour, Biostratigraphie, évolution et renouvellements des ammonites de l'Aptien supérieur (Gargasien) du bassin vocontien (Sud-Est de la France), Thèse, Université Claude Bernard-Lyon 1, novembre 2005.

En ligne : https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2011-09/these_yves_dutour.pdf

Le Gargasien est un sous-étage (une division) de l'Aptien : sur sa définition, Y. Dutour, *op. cit.*, pp. 22-26.

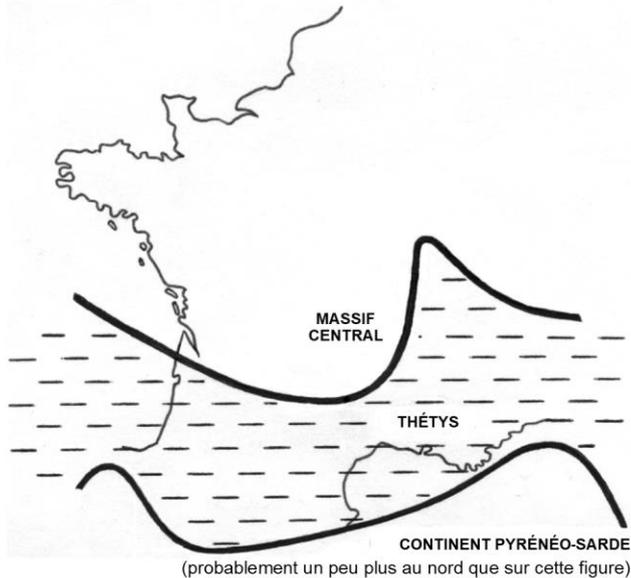
³ C. Balme, Musée de paléontologie du Luberon, Livret guide, Apt, Parc Naturel Régional du Luberon, sans date, p. 8 et fig. 7 p. 9.

⁴ R. Fournier, R. Jullien, B. Lange--Badré, Première découverte de restes de Plésiosaure (Reptilia, Sauropsida) au mont Luberon (Vaucluse), ds Bulletin du Musée d'Histoire Naturelle de Marseille, tome XLII, 1982, pp.43-50.

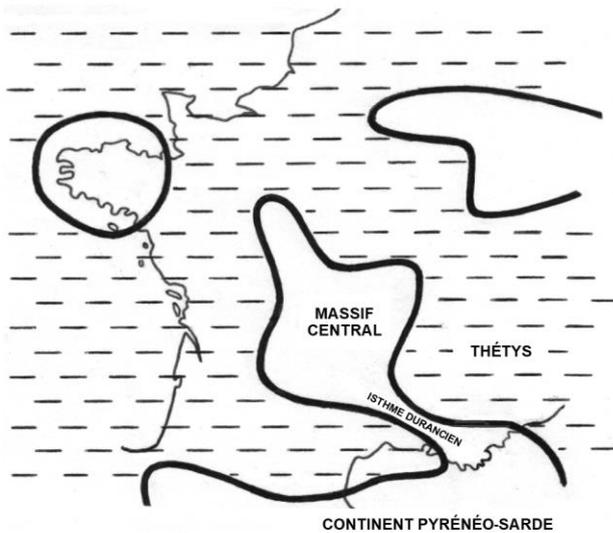
Sur les plésiosaures, voir V. Fischer, Les ichtyosaures du Sud-Est de la France, mémoire de master en sciences géologiques, Université de Liège, année universitaire 2008-2009.

En ligne : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/165724/1/M%C3%A9moireFischer.pdf>

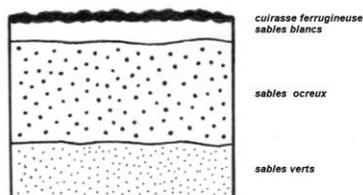
PI. 02 : UNE MER DU LUBERON.



Au début du Crétacé inférieur, une mer occupait notre région : la Thétys alpine (jadis appelée Mésogée). Des sédiments arrachés au Massif Central et au continent pyrénéo-sarde se sont déposés dans cette mer en plusieurs étapes. Ce sont eux qui forment aujourd'hui l'essentiel de la matière du Luberon. Il s'agit d'abord dans tout le massif d'épais bancs de calcaires néocomiens, gris et relativement tendres, auxquels sont venus se superposer dans le petit Luberon des calcaires urgoniens plus blancs et plus durs. Dans la mer du Luberon évoluaient au Crétacé des plésiosaures, comme celui de Peypin d'Aigues, ainsi que des ammonites, très abondantes dans le bassin d'Apt.



Vers la fin du Crétacé inférieur, la mer s'était en partie retirée. Des sables siliceux verdâtres, très riches en fer et en kaolinite (argile blanche très fine) sont venus se déposer et s'accumuler dans une eau peu profonde. En provenance du Massif Central, ils étaient bloqués là par le bombement ou isthme durancien, un cordon d'îles assez serrées qui reliait le Massif Central au continent pyrénéo-sarde. En Provence occidentale cet isthme durancien occupait le sud des Alpilles, la chaîne des Costes et celle de la Trévaresse. Plus à l'est il s'étendait entre Brignoles et les gorges du Verdon.



A la fin du Crétacé inférieur, les sables verts ont émergé. A son terme et pendant tout le Crétacé supérieur, le climat tropical que connaissait la région les a altérés. Le fer contenu dans les couches intermédiaires a fortement coloré celles-ci, les transformant en sables ocreux, et une cuirasse ferrugineuse s'est formée en surface.

marins considérés comme des reptiles vivaient au large, dans des mers aux eaux profondes¹. C'était d'ailleurs très probablement le cas du plésiosaure de la mer du grand Luberon pendant l'Hauterivien, vers -133 ou -130 Ma. La question de la nature de ces animaux pourrait donc se poser, comme elle s'est posée il y a quelques décennies pour les dinosaures².

Dans la première moitié du XIXe siècle, sur la base de vestiges rares et incomplets, on avait en effet rattaché ces derniers aux reptiles. Mais comme c'est souvent le cas en paléontologie les "terribles lézards", pour reprendre l'étymologie du mot inventé en 1841 par R. Owen, ont été en premier lieu... terriblement mal nommés³.

1.3.1.3. Quelques os... et des sables verdâtres.

C'est avant le dépôt en eau profonde des sédiments qui ont fourni plus tard le matériau principal du Luberon (calcaires gris marneux) que l'on rencontre les premiers ossements fossiles dans la région - avant le plésiosaure de Peypin d'Aigues, donc.

Le premier dinosaure provençal connu est un *Compsognathus* (*Compsognathus corallestris* ou *longipes*) retrouvé à Canjuers, dans le Var. Il vivait au nord du continent méditerranéen, dit aussi continent pyrénéo-sarde, que l'on a évoqué plus haut pour expliquer l'origine des sédiments du Néocomien. *Compsognathus longipes* remonte à la fin du Jurassique (Portlandien ou Tithonien, entre -152 et -145 Ma)⁴. C'était un petit dinosaure terrestre, haut de 50 ou 60 cm, long de 1,20 m, ce qui en fait un spécimen assez grand pour un *Compsognathus*. Légèrement bâti, l'animal possédait des mâchoires garnies de dents acérées. Il était carnivore, ou nécrophage. Dans le paysage provençal, il fait un peu figure d'exception. Car il faut attendre l'Albien (entre -113 et -100 Ma) pour trouver d'autres vestiges de dinosaures et c'est à la fin du Crétacé, entre -84 et -66 Ma, que l'on peut rattacher la majeure partie des dinosaures connus dans la région.

Avant de les aborder, il nous faut faire un petit détour par les ocres de la vallée d'Apt, entre Saint-Pantaléon et Gignac. On situe en effet l'origine des sables ocreux à la fin du Crétacé inférieur, entre la fin de l'Aptien (de -120 Ma à -113 Ma) et l'Albien (de -113 Ma à -100 Ma). Mais il n'était alors pas question d'ocres. Il s'agissait de sables à dominante verte, qui se sont déposés en eaux relativement peu profondes.

On se souvient qu'un mouvement tectonique avait provoqué la remontée du fond marin pendant le Barrémien et le début de l'Aptien (entre -130 et -120 Ma) au niveau du petit Luberon. On lui doit la formation des épais bancs de calcaire blanc et dur qui coiffent là le vieux substrat néocomien. A la fin de l'Aptien (entre -120 et -113 Ma environ) probablement dans la continuité de ce mouvement tectonique, un long ruban discontinu de terres basses a émergé au sud de la mer qui recouvrait la vallée d'Apt et le Luberon, entre le continent du Massif Central et le continent pyrénéo-sarde. On l'a baptisé isthme ou bombement "durancien" parce qu'il occupait en partie la place future de la basse vallée de la Durance. Il occupait en effet l'emplacement de la partie méridionale des Alpilles, de la Crau, de la chaîne des Costes et de la Trévaresse. Plus

¹ R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, Paris, A. Colin/Chabaud, 1990, p. 417.

² Il faut cependant noter que l'hérétique R. T. Bakker lui-même a parlé de "lézards" à leur sujet : R. T. Bakker, The dinosaur heresies, New York, W. Morrow and Cy, 1986 (Le ptérodactyle rose, Paris, A. Colin/Chabaud, 1990, notamment p. 417).

³ Richard Owen (1804-1892), a été le premier directeur du British Museum (Natural History). À l'époque on ne connaissait que des squelettes incomplets dont les parties connues évoquaient de gros lézards. Plus près de nous l'*oviraptor* (littéralement le voleur d'œuf) a cependant été baptisé ainsi parce qu'on avait retrouvé ses restes près d'un nid, avant que l'on s'aperçût qu'il s'agissait d'un dinosaure qui couvait ses œufs...

⁴ A. Bidar, L. Demay, G. Thomel, *Compsognathus corallestris*, Une nouvelle espèce de dinosaurien théropode du Portlandien de Canjuers (Sud-Est de la France), ds Annales du Muséum d'Histoire Naturelle de Nice, 1, 1972, pp. 9-40.

R. Allain, X. P. Superbiola, Dinosaurs of France, ds Comptes-Rendus Palevol, 2, 1, 2003, pp. 27-44, ici p. 33. En ligne : https://dinonews.net/rubriq/articles.php?action=open&ref=2003_allain_france

à l'est, il s'étendait entre Brignoles et la vallée du Verdon¹. C'est la forte érosion ayant affecté ce bombement qui se trouve à l'origine de la formation de gisements de bauxite². Mais ce n'est pas là ce qui nous intéresse ici. Le bombement durancien, quoique discontinu, bloquait en effet les courants qui auraient pu emmener au loin les sédiments fins en provenance des reliefs du Massif Central³. Aussi ne faut-il pas s'étonner si nos sables ocreux présentent de nombreuses analogies minéralogiques avec des roches du centre de la France. Ils sont aujourd'hui composés à près de 90 % de grains de quartz qui sont mêlés à une argile très fine, la kaolinite. Lorsqu'elle est pure, celle-ci peut servir à fabriquer de la porcelaine - celle de Limoges notamment. Dans la région, c'est cette kaolinite qui a été exploitée à partir de la première moitié du XVIII^e siècle pour produire la faïence dite d'Apt (bien que la première fabrique fût installée à Castellet)⁴. C'est pendant l'Albien, tandis que les sables verdâtres se déposaient dans la mer de la vallée d'Apt, que l'on trouve la trace fugitive d'un deuxième spécimen de dinosaure dans la région. Il s'agit d'un humérus de grand saurope de la famille du *Diplodocus*, découvert en 1848 à Bédoin dans les grès verts du Ventoux, et baptisé *Aepisaurus elephantinus*. Ces grès verts sont issus des mêmes sables marins que les ocres de la vallée d'Apt. Ils n'ont pas subi la même évolution, car ils sont restés immergés plus longtemps. Cet humérus a donc été retrouvé en pleine mer. On pense que l'animal, mort au bord d'un fleuve, emporté par celui-ci dans la mer, a dû flotter et dériver un moment avant de couler et de tomber sur le fond⁵.

C'est peut-être également le cas d'un autre dinosaure de l'Albien marin connu près de Sisteron. *Genusaurus Sisteronis* a été considéré comme un cératosaure⁶. Comme *Compsognathus longipes*, c'était donc un carnivore, mais bien plus gros : il mesurait environ 6 mètres de long pour 3 mètres de haut avec un poids estimé à une tonne. En fait c'était une sorte de petit tyrannosaure primitif - mais au nez surmonté d'une crête osseuse qui de profil dessinait une ou deux cornes au sommet arrondi.

Il va falloir attendre encore quelque 20 millions d'années pour rencontrer de nouvelles espèces de dinosaures.

1.3.2. Une île, ou des îles, et des ocres.

Au milieu du Crétacé (vers -100 Ma), les terres qui formeraient un jour la vallée d'Apt avaient lentement émergé. Elles constituaient une grande île faiblement vallonnée - ou plutôt peut-être un chapelet de petites îles. Il régnait alors un climat tropical. Sous son influence, les sables verts

¹ S. Molliex, Caractérisation de la déformation tectonique récente en Provence (SE France), Thèse, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, novembre 2009, p. 54.

En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00493766>

Voir aussi (avec une chronologie légèrement décalée) pp. 23-24.

² S. Molliex, Caractérisation de la déformation tectonique récente en Provence (SE France), notamment pp. 24 et 54.

³ Ces reliefs dataient du plissement hercynien (-420 Ma à -275 Ma environ). Au départ très élevés, mais puissamment attaqués par l'érosion dès la fin de l'ère primaire, ils étaient bien érodés à la fin de l'Aptien et au début de l'Albien (-120 à -106 Ma).

⁴ Ses productions les plus originales présentent un aspect jaspé ou marbré dans la masse, obtenu primitivement par l'utilisation d'un mélange de plusieurs argiles fines de même texture (kaolinites) dont les teintes différentes étaient empruntées aux ocres.

⁵ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, ds G. Cheylan (dir.), Dinosaures en Provence, Edisud, 1994 (Les Cahiers de Sainte-Victoire, 1), pp.19-43, ici pp. 28 et 30.

Un autre humérus de saurope trouvé à Mondragon a été signalé en 1894, mais il semble avoir été perdu et l'on ne sait pratiquement rien sur lui.

⁶ H. Accarie, B. Beaudoin, J. Dejoux, G. Fries, J. G. Michard, P. Taquet, Découverte d'un Dinosaurien Théropode nouveau (*Genusaurus sisteronis* n. g., n. sp.) dans l'Albien marin de Sisteron (Alpes de Haute-Provence, France) et extension au Crétacé inférieur de la lignée cératosaurienne, ds Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, IIa, 320, 1995, pp. 327-334.

En Amérique, les Cératosaures sont plus anciens puisqu'on les attribue au Jurassique supérieur (-160 à -145 Ma)

de la fin du Crétacé inférieur se sont altérés. Les sels de fer qu'ils recelaient se sont oxydés. Ils leur ont donné des teintes plus vives, orange ou rouge sombre, qui sont celles des sables ocreux que nous connaissons. Ces sels de fer oxydés sont également à l'origine de la croûte ferrugineuse qui coiffe ces sables. Le processus a été long : il a pu durer jusque vers -60 Ma¹.

1.3.2.1. Dinosaures : des espèces assez nombreuses.

C'est alors que ce processus d'altération des sables verts de la région d'Apt en sables ocreux était déjà bien engagé (entre -84 et -66 Ma) que les dinosaures ont laissé leurs traces les plus nombreuses - ici ou là sous forme d'ossements fossiles (comme à Fox-Amphoux dans le Var) et dans le bassin d'Aix sous celle d'œufs en très grand nombre. Le muséum d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence possède en effet plusieurs centaines de pontes, et on compterait les fragments de coquilles d'œufs par millions si on prenait la peine de le faire...

On trouvait alors des herbivores et des carnivores, ces derniers nécessairement beaucoup moins nombreux : 1 à 5 % du total des animaux, selon les conditions naturelles plus ou moins favorables, d'après R. Bakker². Tous ces animaux ne sont cependant pas exactement contemporains - et compte tenu de la durée de vie d'un genre ou d'une espèce de dinosaure définis encore une fois par R. Bakker (environ 6 Ma)³ certaines n'ont jamais dû se croiser. Ainsi le *Tarascosaurus salluvicus*, un carnivore que l'on date des débuts du Campanien (-84 à -78 Ma)⁴ n'a pas forcément connu et chassé les herbivores *Rhabdodon* et *Hypselosaurus* qui sont datés de la fin du Campanien (-78 à -72 Ma) et surtout du Maastrichtien (-72 à -66 Ma)⁵. Même si c'est tentant, il faut donc se garder d'une vision réductrice de la Provence des dinosaures, qui mettrait en scène concurremment toutes les espèces connues. Mais il y a quand même une fenêtre où ils sont assez nombreux, comme on va le voir.

Au Crétacé supérieur, la plus ancienne espèce connue est donc le *Tarascosaurus salluvicus* (entre -84 et -78 Ma). Lointain descendant du cératosaure de Sisteron, il appartenait à la famille des abélisaures, équivalents des fameux tyrannosaures dans cette partie du monde. Il aurait sans doute effrayé même la terrible Tarasque si elle l'avait croisé⁶. Bien qu'il fût de taille moyenne⁷,

¹ C. Balme, G. Clauzon, M. Denis, M. Dubar, P. Gigot, J.-L. Guendon, S. Legal, M. Liouville, J.-P. Masse, L. Moutier, J. Nicod, D. Nury, M. Philippe, E. Salesse, J.-M. Triat, Découverte géologique du Luberon, Paris/Apt, BRGM/Parc naturel régional du Luberon, 1998, p. 15.

² R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, Paris, A. Colin/Chabaud, 1990, pp. 378-379.

³ R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, pp. 387-393, spécialement p. 391.

A l'étage au-dessus des genres et des espèces, une famille de dinosaures ou de mammifères dure 25 Ma, une famille de reptiles 55 Ma environ.

⁴ J. Le Loeuff, E. Buffetaut, *Tarascosaurus salluvicus* nov. gen., nov. sp., dinosaure théropode du Crétacé supérieur du sud de la France, ds *Geobios* 24, 5, 1991, pp. 585-594.

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001669959180022R>

⁵ Pour le *Rhabdodon*, R. Allain, X. P. Superbiola, *Dinosaurs of France*, p. 35.

Pour le Titanosaure *Hypselosaurus priscus* découvert par P. Matheron dans le bassin d'Aix en 1869, J. Le Loeuff, *Ampelosaurus atacis* (nov. gen., nov. sp.), un nouveau Titanosauridae (dinosauria, Sauropoda) du crétacé supérieur de la Haute Vallée de l'Aude (France), ds *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, IIA*, 321, 1995, pp. 693 à 699, ici p. 698.

En ligne :

https://www.academia.edu/398452/Ampelosaurus_atacis_nov._gen._nov._sp._un_nouveau_Titanosauridae_Dinosauria_Sauropoda_du_Cr%C3%A9tac%C3%A9_sup%C3%A9rieur_de_la_Haute_Vall%C3%A9e_de_lAude_France

⁶ La Tarasque est un animal mythique de la Provence, mi-dragon mi-poisson, qui vivait près de Tarascon dans un bois au bord du Rhône et qui tuait les voyageurs. L'histoire provient peut-être d'un dangereux remous du Rhône au pied du château du Roi René (comme le Charybde de l'Odyssée, dans le détroit de Messine), auquel on aurait associé le crocodile de Nîmes - qui tirerait pour sa part son origine du peuplement de la colonie romaine par des vétérans venus d'Égypte, ou bien d'Égyptiens qu'Auguste aurait déportés là.

⁷ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, ds G. Cheylan (dir.), *Dinosaures en Provence*, Edisud, 1994 (Les Cahiers de Sainte-Victoire, 1), p.31.

par rapport à ses contemporains américains *Tarascosaurus salluvicus* paraît un peu petit avec les 3 mètres de long qu'on lui reconnaît souvent¹. Entre -84 à -70 Ma, *Lythronax argestes*, qui est considéré comme le plus ancien parent connu des Tyrannosaures (et le premier des grands théropodes américains) mesurait en effet 8 mètres de long pour un poids de 2,5 tonnes². Or *Tarascosaurus salluvicus* a été situé aux débuts du Campanien, entre -84 et -78 Ma, c'est-à-dire dans la première moitié de la fourchette attribuée à *Lythronax argestes* (qui est cependant bien trop grande au regard des critères définis par R.T. Bakker). Mais l'identité de ce *Tarascosaurus salluvicus*, de même que son appartenance à la famille des abélisaures, a été mise en doute³. On ne dispose en effet que d'une petite partie de son squelette, un morceau de fémur et les fragments de deux vertèbres, et le premier présente des affinités avec celui du *Genusaurus Sisteronis* trouvé dans la région de Sisteron. On doit toutefois noter que 22 à 28 Ma séparent les deux fossiles, ce qui laisse place chronologiquement selon R.T. Bakker à 4 espèces différentes environ, présentant chacune des caractères évolutifs qui ont pu donner lieu à des convergences.

Ces dernières années, célébrité oblige, de nombreuses études ont été consacrées au tyrannosaure. Elles ont parfois apporté des informations dépassant le genre ou l'espèce. En 2016, on a ainsi réussi à mettre en évidence la présence d'os médullaire chez un spécimen de tyrannosaure⁴. A la suite d'une forte poussée d'œstrogènes, ce type d'os se forme entre la moëlle et l'os compact chez les oiseaux - les oiselles - en train de fabriquer la coquille de leurs œufs. On savait déjà que les théropodes, dont font partie les tyrannosaures, appartenaient à la même lignée que les oiseaux⁵. Mais on ignorait jusque-là que leur métabolisme était aussi proche. On a daté *Tarascosaurus salluvicus* des débuts du Campanien, et il se détache donc légèrement du groupe des autres dinosaures du Crétacé supérieur. Dans celui-ci on trouve des espèces qui

¹ Le site prehistoric wildlife, pourtant souvent assez précis, lui dénie même ces 3 mètres de long.

En ligne : <http://www.prehistoric-wildlife.com/species/t/tarascosaurus.html>

A contrario, quoique l'ayant crédité dans le texte d'une taille moyenne, E. Buffetaut lui a attribué 6 à 7 m de long dans sa Planche d'évaluation de la diversité de taille des dinosaures : E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 17.

Cette estimation en ferait presque alors un précurseur de l'augmentation de la taille des théropodes puisque *Tarascosaurus salluvicus* est sans doute un peu plus vieux que *Lythronax argestes* cité ci-après.

Mais il ne faut pas perdre de vue que des traces de pas relevées dans les grès du Var suggèrent la présence de grands théropodes (jusqu'à 8 m de long) dès le Rhétien (dernier étage du Trias, entre -208 et 200 Ma environ) soit 125 à 130 Ma avant *Lythronax argestes*.

² M. A. Loewen, R. B. Irmis, J. J. W. Sertich, P. J. Currie, S. D. Sampson, Tyrant Dinosaur Evolution Tracks the Rise and Fall of Late Cretaceous Oceans, ds PLoS ONE, novembre 2013.

En ligne : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0079420>

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, King of Gore : voici l'arrière-grand-père du T. rex, ds Sciences et Avenir en ligne, 07.11.2013 (08.11.2013)

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/on-a-decouvert-l-arriere-grand-pere-du-t-rex_21572

Les Tyrannosaures sont apparus vers -70 Ma et ont duré jusqu'à l'extinction des dinosaures vers -66 Ma.

³ R. Allain, X. P. Superbiola, Dinosaurs of France, p. 37.

⁴ M. Higby Schweitzer, W. Zeng, L. Zanno, S. Werning, T. Sugiyama, Chemistry supports the identification of gender-specific reproductive tissue in *Tyrannosaurus rex*, ds Scientific Reports, 6, 2016, article n° 23099.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/srep23099>

Compte-rendu en français : F. Gouty, D'après l'analyse d'un fossile de T. rex, le dinosaure allait être maman, ds Sciences et Avenir en ligne, 17.03.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/d-apres-l-analyse-d-un-fossile-de-t-rex-le-dinosaure-allait-etre-maman_104194

⁵ En fait il y a deux grands ordres de dinosaures : les Ornithischiens (prononcer -iskiëns, car cela vient de l'ischion), qui avaient des "bassins d'oiseaux" et les Saurischiens qui avaient des "bassins de reptiles", Pas très heureusement nommés, encore une fois, car ce sont les Saurischiens que l'on considère comme les ancêtres des oiseaux...

Les Théropodes appartiennent donc aux Saurischiens.

ont pu, pour leur part, se côtoyer. Pour deux d'entre elles, c'est certain : on a retrouvé leurs os mêlés.

Les herbivores, d'abord. Le *Rhabdodon*, décrit par P. Matheron dès 1869, est classé parmi les iguanodons. Il est qualifié de *priscus* (ancien, primitif) ce qui semblerait presque pouvoir le renvoyer au temps de *Tarascosaurus salluvicus* - mais l'unité de temps demeure ici le million d'années, et on l'a retrouvé en compagnie du carnivore *Pyroraptor Olympius* dans des niveaux du Campanien supérieur (-78 à -72 Ma) à La Boucharde, au sud-est de Trets. Au moins ces deux-là étaient contemporains... Long de 3 à 4 mètres¹, on suppose que *Rhabdodon priscus* vivait en groupes. C'était probablement un quadrupède capable de se dresser sur ses pattes arrière, et même de se déplacer sur celles-ci, mais les avis sont encore partagés².

Hypselosaurus priscus également décrit par P. Matheron en 1869, était beaucoup plus gros. Il est couramment daté du Campanien final ou du début du Maastrichtien (entre -75 et -69 Ma). Mais quoiqu'il ait été lui aussi qualifié de *priscus*, dans le bassin d'Aix les œufs qui lui sont attribués semblent présents jusqu'à la fin des dinosaures, vers -66 Ma. On l'a rangé parmi les titanosaures, qui sont des sortes de *Diplodocus* longs d'une quinzaine de mètres au lieu des 30 mètres atteints par ceux-ci - pour une masse estimée de 24 tonnes, ce qui permet d'évaluer le poids de notre titanosaure à une douzaine de tonnes, soit deux éléphants de savane africains. Comme ceux-ci, ils vivaient en groupes pouvant sans doute atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'individus. Cela explique le nombre d'œufs retrouvés en certains points du bassin d'Aix (dans la Sainte-Victoire ou sur le site de l'ancienne gare routière de la ville qui a cédé la place aux Allées provençales.

Dans les niveaux du Maastrichtien de Fox-amphoux, dans le Var, on a également signalé les restes d'un hadrosaure (dinosaur à bec de canard) et d'un nodosaure (dinosaur cuirassé). Mais la documentation demeure très pauvre à leur sujet³. Globalement on trouverait couramment *Rhabdodon*, les titanosaures (dont *Hypselosaurus*), les ankylosaures (dont les nodosaures) et de rares hadrosaures à la fin du Campanien et au début du Maastrichtien, tandis que dans la seconde partie du Maastrichtien *Rhabdodon* et ankylosaures semblent plus rares, laissant le champ libre aux hadrosaures et aux titanosaures⁴.

Contrairement à l'image qui prévalait il y a quelques décennies, il faut se garder d'imaginer ces derniers et la nombreuse famille des *Diplodocus* comme des animaux lents, vivant en partie dans l'eau pour se soulager de leur énorme masse⁵. On est sûr aujourd'hui que malgré leur gigantisme ils n'étaient pas moins vifs que des éléphants de savane, et pouvaient charger aussi vigoureusement. En outre leur queue, fouet redoutable, était bien capable de briser les pattes des plus gros carnivores.

Ce n'est pas dans cette dernière catégorie que l'on peut classer le *Pyroraptor Olympius*⁶ retrouvé en compagnie de *Rhabdodon priscus* à La Boucharde dans des niveaux du Campanien supérieur (-78 à -72 Ma) même si ce devait être un prédateur redoutable. Il appartenait en effet à la vaste famille du *Velociraptor*, immortalisé par le livre et le film "Le parc jurassique" où l'on a sans

¹ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 17.

² En ce sens en tout cas E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, ds G. Cheylan (dir.), Dinosaures en Provence, Edisud, 1994 (Les Cahiers de Sainte-Victoire, 1), p. 38.

³ Voir toutefois E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 38 et p. 39.

Dans sa Planche d'évaluation de la diversité de taille des dinosaures, E. Buffetaut a en outre inclus un *Telmatosaurus* pour représenter les hadrosaures (au lieu de rester plus générique comme pour le nodosaure/ankylosaure) ce qui tend à suggérer que les restes de l'hadrosaure découvert pouvaient présenter des affinités avec cette espèce (*Op. cit.*, p. 17).

⁴ R. Allain, X. P. Superbiola, Dinosaurs of France, ds Comptes-Rendus Palevol, 2, 1, 2003, pp. 27-44, ici p. 38. En ligne : https://dinonews.net/rubriq/articles.php?action=open&ref=2003_allain_france

⁵ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 35.

⁶ Il a certes été découvert en 1989 après un incendie qui a ravagé le Mont Olympe, au-dessus de Trets. Mais quand même, *Voleur du feu de l'Olympe...* Au second degré, on aurait aussi bien pu l'appeler *Prometheus*.

doute, toutefois, beaucoup exagéré son intelligence et ses capacités de nuisance pour les besoins d'effroi du cinéma. Sa taille aussi : dans le film elle se rapproche davantage de celle de *Tarascosaurus salluvicus* que nous avons vu plus haut¹... *Velociraptor* ne mesurait en effet que 0,75 m de haut pour 2 m de long. Dressé de toute sa taille, il ne devait guère dépasser 1 mètre. Il n'avait donc pas besoin de se baisser pour franchir une porte. *Pyroraptor Olympius* était un peu plus petit avec seulement 0,6 m de haut et 1,60 m de long. Mais le cinéma en revanche n'a pas exagéré ses armes : outre une mâchoire garnie de nombreuses dents très tranchantes, ces dinosaures bipèdes qui chassaient peut-être en bandes étaient armés au deuxième doigt de leur "pied" d'une énorme griffe recourbée en forme de faucille qui leur servait très certainement à éventrer leur victime lorsqu'ils se projetaient sur elle "jambes" en avant, à la manière des léopards. Comme *Rhabdodon* avec lequel on l'a retrouvé (et qu'il chassait probablement) on a daté *Pyroraptor Olympius* du Campanien supérieur (-78 à -72 Ma) et peut-être encore du Maastrichtien inférieur (entre -72 et -69 Ma).

A la même époque on connaît cependant un autre parent du *Velociraptor*. Il s'agit de *Variraptor mechinorum*, défini dans le Var comme un droméosaure (l'équivalent américain du *velociraptor*, en principe asiatique)². Un doute subsiste quant à la différenciation avec *Pyroraptor Olympius* mais outre les caractères de leurs os (souvent difficiles à comparer en l'absence de squelettes entiers) il semble que *Variraptor mechinorum* ait été un peu plus grand (jusqu'à 2,5 mètres de long, 1 m de haut et 1,25 m redressé)³.

Enfin, entre le Campanien supérieur et le Maastrichtien inférieur vivait un théropode bien plus gros, de la famille des abélisaures (comme *Tarascosaurus salluvicus*) dont on a trouvé les restes à Pourcieux et le long du tracé autoroutier. Il a été baptisé *Arcovenator escotae* en 2013⁴. Avec lui on arrive dans les gros théropodes. Il mesurait en effet 6 à 7 m de long. Mais il y a quand même un déficit en taille par rapport à *Lythronax argestes* qui vivait sensiblement à la même époque (entre -78 Ma et -69 Ma pour *Arcovenator escotae*, entre -84 et -70 Ma pour *Lythronax argestes* qui serait donc ainsi un tout petit peu plus vieux et néanmoins plus gros). Il est vrai que les théropodes du sud de l'Europe de rattachent plutôt au continent du Sud⁵ (Gondwana regroupant des terres situées aujourd'hui en Amérique du sud, Afrique, Inde, Australie et Antarctique) qu'à celui du Nord (Laurasie regroupant en principe Amérique du Nord et Eurasie). Les terres qui deviendraient un jour l'Europe revêtaient alors l'aspect d'un archipel⁶ et notre région se trouvait relativement proche du continent du Sud. On parle alors souvent d'une

¹ Le cinéma les a faits également plus massifs que ce qu'ils devaient être, ce qui les y rapproche encore de *Tarascosaurus salluvicus*.

² J. Le Loeuff, E. Buffetaut, A new dromaeosaurid theropod from the Upper Cretaceous of Southern France, ds *Oryctos*, 1, octobre 1999, pp. 105-112.

En ligne : http://www.dinosauria.org/documents/2002/le_loeuff_buffetaut_1998_oryctos1_105-112.pdf

³ Sur les profils de ces dinosaures et d'autres animaux préhistoriques on peut consulter le site :

<http://www.prehistoric-wildlife.com/index.html>

⁴ E. Buffetaut, P. Mechin, A. Mechin-Salessy, Un dinosaure theropode d'affinités gondwaniennes dans le Crétacé supérieur de Provence, ds *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II*, 306, 2, 1988, pp. 153-158.

T. Tortosa, E. Buffetaut, N. Vialle, Y. Dutour, E. Turini, G. Cheylan, A new abelisaurid dinosaur from the Late Cretaceous of southern France: Palaeobiogeographical implications, ds *Annales de Paléontologie*, 100, 1, octobre 2013,

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/259295271_A_new_abelisaurid_dinosaur_from_the_Late_Cretaceous_of_southernFrance_Palaeobiogeographical_implications

⁵ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 38.

Voir aussi Y. Laurent, Les faunes de vertébrés continentaux du Maastrichtien supérieur d'Europe, systématique et biodiversité, Thèse, Université Paul Sabatier - Toulouse III, septembre 2002, ici p. 3.

En ligne : <https://strata.fr/pdf/Strata2003-2.41-maastrichtien-laurent.pdf>

On a trouvé en Inde, dans le Deccan, des œufs très semblables à ceux du bassin d'aix : E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 51.

⁶ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 38.

grande île franco-ibérique¹, mais il n'est pas exclu que cette grande île fût en fait un archipel au sud de l'archipel européen. Ce pourrait être en effet le caractère insulaire de leur habitat qui aurait produit des tailles un peu plus faibles que la moyenne pour bon nombre d'espèces². Pendant très longtemps, on a représenté tous ces dinosaures glabres, seulement vêtus d'une peau plus ou moins écailleuse ou cuirassée grisâtre ou verdâtre, éventuellement parsemée de taches ou de rayures pour se camoufler. L'erreur initiale de classement parmi les reptiles n'y était certainement pas pour rien... Bien sûr, il y avait l'*Archaeopteryx lithographica* trouvé à Solnhofen en Bavière et publié dès 1861 par H. von Meyer. L'animal avait indubitablement des plumes, mais il conservait des caractères très proches de ceux des théropodes. On a longtemps pensé qu'il représentait un animal intermédiaire entre les dinosaures et les oiseaux, pas forcément suivi d'une descendance - une sorte de voie sans issue. De fait il est très ancien (fin du Jurassique, entre -156 et -145 Ma). A cette époque les dinosaures régnaient en maîtres, et encore pour 80 millions d'années. Au début des années 1970 toutefois, l'idée que les oiseaux étaient les descendants des dinosaures, en particulier des théropodes, faisait son chemin - et on a commencé à imaginer que ces derniers pussent être... couverts de plumes³. Pourtant il a fallu attendre la fin des années 1990 pour trouver des fossiles permettant de donner corps à la théorie, notamment dans l'Est de la Chine le *Sinosauropteryx* d'abord identifié comme un oiseau puis comme un petit dinosaure, assez proche du *Compsognathus* mais couvert de duvet ou de plumes très fines. Il vivait entre -129 et -122 Ma. Au début des années 2000 enfin, des fossiles découverts dans le nord de la Chine ont montré que le corps d'un parent du *Velociraptor* vieux de 125 millions d'années, baptisé *Sinornithosaurus*, était couvert de plumes⁴. Depuis on a étendu les conclusions tirées de son étude à bien d'autres espèces de dinosaures - notamment, en Chine encore, un parent du célèbre *Tyrannosaurus rex*⁵. Plus récemment, on a examiné des fossiles de ptérosaures (famille de dinosaures volants apparus à la fin du Trias, entre 225 et 200 Ma) dont les plumes se sont révélées identiques à celles des autres dinosaures à plumes connus⁶.

¹ Par exemple E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, pp. 39, 42.

² En ce sens T. Tortosa, E. Buffetaut, N. Vialle, Y. Dutour, E. Turini, G. Cheylan, A new abelisaurid dinosaur from the Late Cretaceous of southern France: Palaeobiogeographical implications, ds Annales de Paléontologie, 100, 1, octobre 2013, ici p. 11.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/259295271_A_new_abelisaurid_dinosaur_from_the_Late_Cretaceous_of_southernFrance_Palaeobiogeographical_implications

³ R. T. Bakker, P. M. Galton, Dinosaur Monophyly and a New Class of Vertebrates, ds Nature, 248, 1974, pp. 168-172.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/248168a0>

R. T. Bakker, Dinosaur Renaissance, ds Scientific American, avril 1975.

En ligne : <https://www.scientificamerican.com/article/dinosaur-renaissance/>

⁴ X. Xing, Z. Zhong-he, R. O. Prum, Branched integumental structures in *Sinornithosaurus* and the origins of feathers ds Nature, n° 410, mars 2001, pp. 200-204.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/35065589>

R. O. Prum, Dinosaurs take to the air, ds Nature, n° 421, 23 janvier 2003, pp. 323-324.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/421323a>

X. Xing, Z. Zhonghe, W. Xiaolin, K. Xuewen, Z. Fucheng, D. Xiangke, Four-winged dinosaurs from China, ds Nature, n° 421, janvier 2003, pp. 335-340.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/nature01342>

⁵ X. Xing, W. Kebai, Z. Ke, M. Qingju, L. Xing, S. Corwin, H. Dongyu, C. Shuqing, W. Shuo, A gigantic feathered dinosaur from the Lower Cretaceous of China, ds Nature, 484, 2012, 92-95.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/223962806_A_gigantic_feathered_dinosaur_from_the_Lower_Cretaceous_of_China

⁶ Y. Zixiao, J. Baoyu, M. E. McNamara, S. L. Kearns, M. Pittman, T. G. Kaye, P. J. Orr, X. Xing, M. J. Benton, Pterosaur integumentary structures with complex feather-like branching, ds Nature Ecology & Evolution, 3, 2019, pp. 24-30.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0728-7>

Les spécimens étudiés, appartenant à la famille des Anurognathidés, datent du Jurassique moyen (-175 à -160 Ma). La séparation des ptérosaures avec ces autres dinosaures étant très ancienne, cela tendrait à montrer que leur ancêtre commun, un archosaure qui vivait vers -250 Ma, au lendemain de la grande extinction qui a mis fin au Permien¹, possédait déjà ces plumes. La mise en évidence en 2018 de la capacité de certains thérapsidés à produire leur chaleur corporelle (endothermie) et à la maintenir constante (homéothermie)² de même que la présence de poils relevée chez des cynodontes du début du Trias³ (vers -250, -240 millions d'années) indiquent que les poils ont dû apparaître à la fin du Permien, entre -270 Ma et -250 Ma. Comme on l'a vu plus haut, il est très vraisemblable qu'il en a été de même pour les plumes dans certaines lignées d'archosaures - dont l'évolution est parallèle à celle des cynodontes, et chez lesquelles l'endo-homéothermie semble également très ancienne. L'étude des ptérosaures du Jurassique moyen a permis en tout cas d'identifier quatre types de plumes. Elles sont assez différentes des plumes d'oiseaux que nous connaissons aujourd'hui et qui sont, pour la plupart, destinées à permettre aux oiseaux de voler. Leurs fonctions étaient sans doute tout autres. Autant qu'à réguler leur température, ces plumes archaïques auraient servi aux dinosaures à se camoufler⁴. De fait elles pouvaient être diversement colorées. En 2016, on a retrouvé en Chine un fossile attribué à un oiseau primitif, *Eoconfuciusornis*, daté de -130 Ma, sur lequel on a pu identifier des substances qui étaient à coup sûr des pigments colorés (mélanosomes)⁵. On a prudemment avancé du blanc, du marron et du noir. Mais certains chercheurs ont suggéré que ces oiseaux primitifs - et les dinosaures à plumes qui vivaient à la même époque - pouvaient très bien marier le rouge, le bleu, le jaune ou le vert dans leurs plumages - avec toutes les nuances connues chez les oiseaux actuels. En 2016, on a fait état de la découverte en Birmanie d'un morceau de la queue d'un petit dinosaure terrestre à plumes, *Coelurosaurus*, de la famille des théropodes,

Compte-rendu et développement en français : J. Leyes, L'origine des plumes repoussée de 70 millions d'années, ds Sciences et Avenir en ligne, 21.12.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/les-plumes-existaient-deja-il-y-a-250-millions-d-annees_130369

¹ Peut-être *Ornitosuchus* : voir M. Benton, Le règne des reptiles, p. 81.

² K. Rey, R. Amiot, F. Fourel, F. Abdala, F. Fulteau, N.-E. Jalil, L. Jun, B. S. Rubidge, R. M. H. Smith, Oxygen isotopes suggest elevated thermometabolism within multiple Permo-Triassic therapsid clades, ds eLife, 6, 18 juillet 2017, 28589.

En ligne : <https://elifesciences.org/articles/28589>

Compte-rendu en français : L. Peillon-Comby, K. Rey, C. Lécuyer, Nos ancêtres ont eu le sang chaud juste avant l'extinction du Permien-Trias, C.N.R.S., Communiqué de presse national, Paris, 18 juillet, 2017.

En ligne : <http://www.cnrs.fr/fr/nos-ancetres-ont-eu-le-sang-chaud-juste-avant-lextinction-du-permien-trias>

³ M. Benton, Le règne des reptiles, Edimages, 1990, p. 68.

Les cynodontes constituent une famille, ancêtre des mammifères, qui appartenait à l'ordre (ou clade) des thérapsidés.

⁴ J. Vinther, R. Nicholls, S. Lautenschlager, M. Pittman, T. G. Kaye, E. Rayfield, G. Mayr, I. C. Cuthill, 3D Camouflage in an Ornithischian Dinosaur, ds Current Biology, 26, 18, septembre 2016, pp. 2456-2462

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982216307060>

Compte-rendu en français : M. Le Poaizard, Avec le psittacosaure, on a enfin la preuve que les dinosaures se camouflaient, ds Sciences et Avenir en ligne, 20.09.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/avec-le-psittacosaure-on-a-enfin-la-preuve-que-les-dinosaures-se-camouflaient_105040

⁵ P. Yanbong, Z. Wenxia, A. E. Moyer, J. K. O'Connor, W. Min, Z. Xiaoting, W. Xiaoli, E. R. Schroeter, Z. Zhonghe, M. H. Schweitzer, Molecular evidence of keratin and melanosomes in feathers of the Early Cretaceous bird *Eoconfuciusornis*, ds PNAS, 113, 49, décembre 2016, pp. 7900-7907.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/113/49/E7900>

Compte-rendu en français : J. Lacoste, Découverte d'un fossile d'oiseau avec ses plumes et ses couleurs, ds Sciences et Avenir en ligne, 29.11.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/un-fossile-d-oiseau-de-130-millions-d-annees-a-conserve-ses-plumes-et-ses-couleurs_108428

datant de -99 Ma¹. Conservée dans un bloc d'ambre, la pièce a montré que les plumes y formaient des paquets et n'étaient pas organisées pour voler comme celles des oiseaux. Or des plumes semblables à celles des oiseaux modernes et disposés comme sur ceux-ci ont été reconnues l'année suivante sur un autre dinosaure (*Jianianhualong tengi*) daté de -125 Ma². Elles étaient donc déjà acquises à cette époque, et en 25 Ma elles auraient très bien pu se généraliser si le vol avait constitué l'aboutissement normal des plumes pour les dinosaures. Au demeurant, si les plumes sont bien apparues en même temps que les poils à la fin du Permien, entre -270 Ma et -250 Ma, pour qu'elles se maintinssent pendant plus de 140 millions d'années sans être liées au vol, il fallait bien que celui-ci ne fût pas primordial. Pour certains oiseaux, il ne l'est d'ailleurs toujours pas. Au Crétacé c'était sans doute le cas de *Gargantuavis philoinos*, un oiseau primitif trouvé à Fox-Amphoux dans le Var dans des niveaux de la fin du Campanien et du début du Maastrichtien (entre -78 et -69 Ma)³ et à ce titre contemporain des iguanodons, titanosaures, hadrosaures et nodosaures évoqués plus haut. La morphologie suggérée par les quelques os retrouvés, notamment les fémurs, indique que *Gargantuavis* devait être un oiseau coureur d'une taille comprise entre celle d'un émeu et celle d'une autruche. Pour les dinosauriens, on pourrait donc considérer le vol simplement comme une opportunité que l'évolution des plumes à permise, et dont certaines espèces se sont fait une spécialité. Un autre exemple de cette évolution différenciée, et de cette spécialisation, est marqué par un jeune oiseau primitif contemporain du petit *Coelurosaurus* (-99 Ma) également fossilisé dans l'ambre⁴. Ces dernières années en effet, sans doute parce qu'il a été prospecté plus méthodiquement,

¹ L. Xing, R. C. McKellar, X. Xing, Li Gang, B. Ming, W. S. Persons IV, T. Miyashita, M. J. Benton, Z. Jianping, A. P. Wolfe, Y. Qiru, T. Kuowei, R. Hao, P. J. Currie, A Feathered Dinosaur Tail with Primitive Plumage Trapped in Mid-Cretaceous Amber, ds *Current Biology*, 20, 24, décembre 2016, pp. 3352-3360. En ligne : [https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(16\)31193-9](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(16)31193-9)

Compte-rendu en français : J. Lacoste, La découverte rare d'une queue de dinosaure à plumes préservée dans de l'ambre, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 12.12.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/la-decouverte-rare-d-une-queue-de-dinosaure-a-plumes-preservee-dans-de-l-ambre_108797

² X. Xing, P. Currie, M. Pittman, L. Xing, M. Qingjin, L. Junchang, H. Dongyu, Y. Congyu, Mosaic evolution in an asymmetrically feathered troodontid dinosaur with transitional features, ds *Nature communications*, 8, 2017, article n° 14972.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/ncomms14972>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Un dinosaure doté de plumes profilées pour le vol, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 04.05.2017.

https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/un-dinosaure-dote-de-plumes-profilees-pour-le-vol_112611

³ E. Buffetaut, D. Angst, P. Mechin, A. Mechin-Salessy, Un fémur de l'oiseau géant *Gargantuavis* du Crétacé supérieur du Var (sud-est de la France), ds *Carnets natures*, 6, 2019, pp. 47-52.

En ligne : <https://carnetsnatures.fr/volume%206/gargantuavis-buffetautetal.pdf>

⁴ L. Xing, J. K. O'Connor, R. C. McKellar, L. M. Chiappe, T. Kuowei, L. Gang, B. Ming, A mid-Cretaceous enantiornithine (Aves) hatchling preserved in Burmese amber with unusual plumage, ds *Gondwana Research*, 49, septembre 2017, pp. 264-277.

En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X17300527>

Compte-rendu en français : E. Lecomte, Un incroyable fossile d'oisillon griffu pris dans l'ambre, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 09.06.2017.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/un-incroyable-fossile-d-oisillon-griffu-pris-dans-l-ambre_113724

Il reste que malgré la présence d'oiseaux primitifs dès -130 Ma (*Eoconfuciusornis*) il faudra toutefois attendre -66,7 Ma pour rencontrer le premier oiseau moderne, *Asteriornis maastrichtensis*, baptisé par les médias "wonderchicken" :

D. J. Field, J. Benito, A. Chen, J. W. M. Jagt, D. T. Ksepka, Late Cretaceous neornithine from Europe illuminates the origins of crown birds, ds *Nature*, 579, mars 2020, pp. 397-401.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2096-0>

Compte-rendu en français : R. Mulot, Premier oiseau moderne, le grand ancêtre des poulets et des canards a 66 millions d'années, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 25.03.2020.

l'ambre s'est révélé riche en découvertes de plumes (de dinosaures et d'oiseaux primitifs) parfois même associées à des parasites tels que poux et tiques dont les animaux devaient être infestés¹. Des différences sont pourtant apparues entre oiseaux primitifs et dinosaures. Contrairement aux oiseaux modernes, chez qui elles ne poussent qu'une fois l'animal ayant achevé sa croissance, les dinosaures à plumes semblent d'ailleurs avoir arboré les leurs bien plus tôt². Le besoin de se mettre en valeur pour s'accoupler n'aurait donc pas été plus primordial pour eux que celui de voler, puisqu'elles apparaissaient avant que ce besoin se fit sentir. Réguler sa température corporelle, mais aussi et surtout peut-être se camoufler des prédateurs toujours à l'affût demeurait en revanche primordial, et concernait également les jeunes.

Quoi qu'il en soit, aujourd'hui on peut imaginer que *Tarascosaurus salluvicus*, *Pyroraptor Olympius*, et sans doute même *Compsognathus corallestris* (ou *longipes*) et *Genusaurus Sisteronis* avaient des plumes primitives sur tout le corps ou certaines parties du corps. C'est beaucoup plus incertain pour *Rhabdodon priscus* et *Hypselosaurus priscus*. Les gros mammifères herbivores (éléphants, rhinocéros, hippopotames) sont aujourd'hui très peu velus. On serait donc tenté d'imaginer les grands dinosaures herbivores majoritairement dépourvus de plumes. Cette image est corroborée par les rares trouvailles d'empreintes ou de fossiles de peau qui font apparaître des plaques osseuses, ou des écailles de formes et de tailles diverses. C'est le cas pour un hadrosaure (dinosaur à "bec de canard") étudié en décembre 2019 sur lequel on a pu identifier derme et épiderme, et même isoler des fragments du système vasculaire superficiel, sans que l'on trouve trace de plumes³. On a par contre reconnu sur sa peau des écailles de 1 à 12 mm de diamètre, irrégulières et d'aspect caillouteux. Finalement peu épaisse (3 à 3,3 mm selon les écailles de la zone concernée) cette peau aurait pourtant été très résistante grâce à la disposition des couches qui la composaient (notamment les écailles de différentes

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/le-grand-ancetre-des-poulets-et-des-oiseaux-modernes-a-66-millions-d-annees_142606

¹ Poux (-100 Ma) :

G. Taipng, Y. Xiangchu, S. Chungkun, A. P. Rasnitsyn, X. Xing, C. Sha, W. Chen, R. Dong, New insects feeding on dinosaur feathers in mid-Cretaceous amber, ds Nature Communications, 10, 2019, article n° 5424.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13516-4>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Les dinosaures avaient des poux, la preuve dans l'ambre, ds Sciences et Avenir en ligne, 10.12.2019.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/les-dinosaures-avaient-des-poux-la-preuve-dans-l-ambre_139672

Tique (-100 Ma) :

E. Peñalver, A. Arillo, X. Delclòs, D. Peris, D. A. Grimaldi, S. R. Anderson, P. C. Nascimbene, R. Pérez de la Fuente, Ticks parasitised feathered dinosaurs as revealed by Cretaceous amber assemblages, ds Nature Communications, 8, 2017, article n° 1924.

En ligne : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5727220/>

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, Découverte d'une tique pleine de sang de dinosaure, façon Jurassic Park, ds Sciences et Avenir en ligne, 14.12. 2017.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/une-tique-pleine-de-sang-de-dinosaure-decouverte-dans-de-l-ambre_119147

² A. W. Proust, G. Chuiling, D. J. Varrichio, W. Jianlin, Z. Fengjiao, A new microraptorine theropod from the Jehol Biota and growth in early dromaeosaurids, ds The Anatomical Record, 303, 4, avril 2020 (numéro spécial The hidden World of Dinosaurs, pp. 963-987.

En ligne : <https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ar.24343>

Compte-rendu en français : H. Chapuis, Un fossile révèle une différence majeure entre les oiseaux et les dinosaures, ds Sciences et Avenir en ligne, 17.01.2020.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/le-fossile-de-wulong-bohaiensis-revele-une-difference-majeure-entre-les-oiseaux-et-les-dinosaures-dont-ils-descendent_140562

³ M. Fabbri, J. Wiemann, F. Manucci, D. E. G. Briggs, Three-dimensional soft tissue preservation revealed in the skin of a non-avian dinosaur, ds Palaeontology, 63, 2, décembre 2019, pp. 185-193.

En ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pala.12470?af=R>

PDF : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/pala.12470?download=true>

Le spécimen a été classé sous le code YPMPU 016969.

tailles). C'est ce qui aurait entre autres permis qu'elle pût si bien se conserver. A l'exemple de cet hadrosaure, on peut considérer que si les plumes avaient une fonction de camouflage, elles devaient être plus utiles aux carnassiers et aux petits herbivores qu'aux grands herbivores vivant en troupeaux. Il en allait sans doute autrement pour les grands herbivores solitaires, comme les nodosaures proches des ankylosaures et bardés comme eux d'une cuirasse de plaques osseuses garnie de piques. L'étude d'un spécimen très impressionnant, presque entier et en relief, découvert en 2011 dans l'Alberta, au Canada (*Borealopelta markmitchelli*)¹ a en effet révélé la présence de mélanine. La répartition de celle-ci a suggéré sur les flancs de l'animal une pigmentation dessinant un contre-ombrage destiné à se fondre dans la végétation. Les pointes garnissant son armure, plus claires, auraient participé à ce camouflage tout en se signalant comme dangereuses pour les prédateurs. Camouflage et démonstration de force auraient donc constitué les armes de cet ankylosaure de près plus de 5 mètres de long et d'une masse estimée à 1,3 tonne qui vivait il y a environ 110 Ma. Comme il fallait s'y attendre, les stratégies de défense auraient donc varié d'une espèce à l'autre, exactement comme chez les grands mammifères herbivores.

Les études récentes sur les dinosaures sont allées plus loin. La découverte de fossiles extrêmement bien conservés a permis de réaliser une approche de la structure de leur cerveau. Le premier de ces fossiles a été découvert en 2004 dans le Sussex, en Angleterre. Il s'agissait du cerveau d'un iguanodon vivant il y a 133 Ma - un parent de notre *Rhabdodon priscus*, mais plus vieux de quelque 60 Ma. Sa publication en 2016 a mentionné des morceaux de tissus du cortex, de petits vaisseaux sanguins et sans doute des fragments de méninges². La structure du cerveau aurait présenté des affinités avec les cerveaux des oiseaux et des crocodiles. Mais la partie du cerveau conservée était trop petite pour pouvoir envisager les capacités cérébrales de l'animal. Cette lacune a été comblée en juin 2020 grâce à l'étude du cerveau d'un ankylosaure trouvé en Ouzbékistan qui vivait il y a 90 Ma³. D'abord le cerveau était tout petit : 26,5 grammes environ pour un animal de 3 mètres de long et d'un poids estimé de 1 à 1,2 tonne. Ensuite sa structure faisait la part belle à l'odorat et à l'ouïe, ce qui se comprend chez un herbivore qui, bien que doté d'une cuirasse osseuse, demeurait une proie potentielle pour les théropodes. Les bulbes olfactifs occupaient plus de la moitié du volume du cerveau. En outre, comme les grands mammifères actuels (et notamment les éléphants) l'ankylosaure étudié devait très bien percevoir les basses fréquences entre 100 et 3000 Hz. Cela pouvait lui servir à percevoir l'approche des prédateurs, mais aussi, comme chez l'éléphant actuel, à communiquer dans un registre inaudible

¹ C. M. Brown, D. M. Henderson, J. Vinther, I. Fletcher, A. Sistiaga, J. Herrera, R. E. Summons, An Exceptionally Preserved Three-Dimensional Armored Dinosaur Reveals Insights into Coloration and Cretaceous Predator-Prey Dynamics, ds *Current Biology*, 27, 6, Août 2017, pp. 2514-2521.

En ligne : [https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(17\)30808-4](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(17)30808-4)

² M. D. Brasier, D. B. Norman, A. G. Liu, L. J. Cotton, J. E. H. Hiscocks, R. J. Garwood, J. B. Antcliffe, D. Wacey, Remarkable preservation of brain tissues in an Early Cretaceous iguanodontian dinosaur, ds *Geological Society, London, Special Publications*, 448, octobre 2016, pp. 383-398.

En ligne : <https://sp.lyellcollection.org/content/448/1/383>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Un cerveau fossile de dinosaure découvert, ds *Sciences et Avenir en ligne*, 28.10.2016.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/un-cerveau-fossile-de-dinosaure-decouvert_107792

³ I. Kuzmin, I. Petrov, A. Averianov, E. Boitsova, P. Skutschas, H.-D. Sues,

The braincase of *Bissektipelta archibaldi*, new insights into endocranial osteology, vasculature, and paleoneurobiology of ankylosaurian dinosaurs, ds *Biological Communications*, 65, 2, avril-juin 2020, pp. 85-156.

En ligne ; <https://biocomm.spbu.ru/article/view/6151>

Compte-rendu en français : J. Ignasse, Un cerveau de dinosaure reconstitué en 3D, ds *Sciences et avenir en ligne*, 11.06.2020.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/un-cerveau-de-dinosaure-reconstitue-en-3d_144986

pour la plupart de ceux-ci. Cette étude renvoie à des travaux antérieurs, réalisés avec des moyens moins sophistiqués mais qui conservent tout leur intérêt. En 2008, on avait ainsi noté que chez les tyrannosaures et les droméosaures (proches parents de *Pyroraptor Olympius*) les bulbes olfactifs étaient significativement plus importants que chez les cératosaures et les oviraptors¹. On avait également estimé que chez les tyrannosaures, les allosaures et les oiseaux primitifs ces bulbes olfactifs occupaient jusqu'à 95 % du volume cérébral - estimation revue à la baisse en 2020 (autour de 70 %).

Enfin, l'étude de *Borealopelta markmitchelli*, découvert dans l'Alberta et déjà cité plus haut, a permis d'approcher son régime alimentaire et de confirmer le fonctionnement de son système digestif tout en définissant son environnement². Dans l'estomac de ce nodosaure, on a en effet retrouvé des végétaux et de petits galets (gastrolithes) destinés à faciliter le broyage des aliments qu'il devait avaler presque tout ronds. Aujourd'hui on retrouve des gastrolithes chez les crocodiles et sous forme plus réduite dans le gésier des oiseaux, notamment des poules sous forme de gravillons. On peut repérer les gastrolithes à leur poli particulier. On en avait déjà trouvé à l'intérieur de squelettes de dinosaures - mais là, on les a trouvés en place, dans l'estomac du nodosaure. Les plantes consommées ont révélé un peu de son régime alimentaire et du paysage qui l'entourait il y a 110 Ma environ. On a retrouvé des restes de feuilles (88 %), des tiges, du bois et du charbon de bois. Les fougères représentaient 85 % des feuilles, la famille des cycas 3 % et on a noté la présence de traces de feuillage de conifères. Le reste n'était pas identifiable. L'ensemble peut être interprété comme un environnement de forêts de conifères primitifs soumises à des incendies, et se renouvelant sous la forme de fougères avant que les conifères revinssent. Le nodosaure aurait recherché préférentiellement les fougères, et consommé accidentellement les cycas et les conifères, de même que les charbons de bois présents à la base des premières... On a noté bien sûr l'absence d'herbes (Poacées, graminées) dans le régime alimentaire du vieil ankylosaure : celles-ci ne sont apparues qu'à la fin du Crétacé³, au Maastrichtien encore une fois. On les a alors identifiées en Inde (continent du Sud, Gondwana) dans... des bouses de dinosaures fossilisées (coprolithes). Nos titanosaures pouvaient donc, comme les hadrosaures, s'en régaler, puisqu'ils bénéficiaient des conditions de ce continent du Sud.

1.3.2.2. Et des œufs, par milliers.

Les témoins des dinosaures ne s'arrêtent pas aux empreintes qu'ils ont laissées et à leurs ossements. Dans le bassin d'Aix, on a vu plus haut que l'on compte les œufs de dinosaures par milliers. Le muséum d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence en possède 600 environ à peu près intacts, quoique tous éclos, retrouvés dans des pontes. Jusqu'à présent on n'a jamais découvert la trace d'un embryon presque à terme, ou bien un tout jeune, permettant d'identifier l'espèce à laquelle ils appartiennent. Sur des critères de taille et de nombre, on les a attribués principalement au titanosaure *Hypselosaurus priscus*, mais en fait si ses œufs sont peut-être les plus nombreux, ils ne sont pas les seuls. On connaît en effet au moins six variétés différentes

¹ D. K. Zelenitsky, F. Therrien, Y. Kobayashi, Olfactory acuity in theropods: palaeobiological and evolutionary implications, ds Proceedings of The Royal society B, 267, 1657, novembre 2008, pp. 667-673.
En ligne : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2008.1075>

² C. M. Brown, D. R. Greenwood, J. E. Kalyniuk, D. R. Braman, D. M. Henderson, C. L. Greenwood, J. F. Basinger, Dietary palaeoecology of an Early Cretaceous armoured dinosaur (Ornithischia; Nodosauridae) based on floral analysis of stomach contents, ds Royal Society Open Science, 7, 6, juin 2020,
En ligne : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.200305>

³ V. Prasad, C. A. E. Strömberg, H. Alimohammadian, A. Sahni, Dinosaur Coprolites and the Early Evolution of Grasses and Grazers, ds Science, 310, 5751, novembre 2005, pp. 1177-1180.
En ligne : <https://science.sciencemag.org/content/310/5751/1177>
D. R. Piperno, H.-D. Sues, Dinosaurs Dined on Grass, ds Science, 310, 5751, novembre 2005, pp. 1126-1128.
En ligne : <https://science.sciencemag.org/content/310/5751/1126>

(et peut-être même dix)¹ - que l'on pourrait donc rattacher à six (ou dix) espèces différentes de dinosaures. Leurs coquilles ont un diamètre qui varie de 8 à 24 cm², ce qui confirme cette diversité - tout comme la structure des coquilles. Certaines en effet sont lisses, d'autres grenues sont couvertes de minuscules aspérités ou tubercules³. On a imaginé que ces aspérités pouvaient protéger les pores des coquilles d'un colmatage par la vase ou le sable, et permettre ainsi à l'embryon de respirer. Les œufs présentant de type de coquilles auraient donc été pondus relativement profond, tandis que les œufs à coquilles lisse auraient été pondus en surface. On connaît effectivement au moins deux types de pontes. Les unes sont des pontes en ligne, constituées de plusieurs rangées d'œufs disposés concentriquement, ou vaguement en spirale, ce qui laisse penser que la femelle les a pondus en tournant sur elle-même. Les autres sont des pontes en pyramide, qui devaient être disposées dans des fosses ou des creux d'un diamètre de 0,80 m à 2 m et d'une profondeur de 1 m environ. Elles étaient peut-être recouvertes de sable ou de végétaux en décomposition. Mais il reste malaisé de définir ces pontes car le nombre d'œufs est souvent limité, de 4 à 13 en moyenne. Une femelle pouvant pondre une cinquantaine d'œufs, on a pensé qu'elle les disposait dans plusieurs nids de sorte à leur assurer plus de chances d'échapper aux prédateurs. Il devait en effet y avoir des voleurs d'œufs, même si le plus célèbre d'entre eux, *Oviraptor philoceratops*, identifié en 1924 Mongolie, s'est révélé par la suite n'être qu'un petit théropode en train de couvrir ses propres œufs... La question de la couvaison des dinosaures est ensuite revenue régulièrement. Certains d'entre eux devaient simplement abandonner leurs œufs (c'était probablement le cas des titanosaures comme *Hypselosaurus priscus*) mais on est sûr que d'autres restaient à proximité et les couvaient... au moins du regard. Il s'agissait sans doute davantage en effet de protection que d'incubation. Parmi les oviraptorosaures - car ils sont très nombreux ! - les plus petites espèces de la taille d'un dindon (par exemple le spécimen baptisé *Yulong*) se posaient sur les œufs, mais les plus grosses (jusqu'à 8 m de long pour 1,4 tonne pour le *Gigantoraptor*) s'installaient très vraisemblablement au milieu de la ponte disposée en cercle autour d'un espace central que l'animal se réservait⁴. Dans le bassin d'Aix comme en Chine, les œufs révèlent cependant une diminution du nombre des espèces avant l'extinction qui marque la fin du Crétacé⁵. Tous les dinosaures ont en effet disparu vers -66 Ma, pour des raisons qui demeurent relativement obscures. Le climat pourrait indirectement occuper une place déterminante. En Chine on a ainsi pu faire débiter la diminution du nombre des espèces 200 ou 300.000 ans avant l'extinction finale, et la mettre en relation avec une aridification du climat⁶. Bien avant la découverte de l'évènement de Chicxulub dans le nord-ouest du Yucatan (Mexique), on avait

¹ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, pp. 49 et 47.

² E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 44.

³ Les plus gros tubercules peuvent mesurer 0,5 mm ou 1 mm.

⁴ K. Tanaka, D. K. Zelenitsky, L. Junchang, C. L. DeBuhr, Y. Laiping, J. Songhai, D. Fang, X. Mengli, L. Di, S. Caizhi, C. Rongjun, J. Songhai, Incubation behaviours of oviraptorosaur dinosaurs in relation to body size, ds *Biology Letters* (The Royal Society), 14, 5, mai 2018.

En ligne : <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsbl.2018.0135>

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, Même les gros dinosaures pouvaient couvrir, ds *Sciences et Avenir* en ligne, 21.05.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/meme-les-gros-dinosaures-pouvaient-couvrir_124049

⁵ E. Buffetaut, Les dinosaures de Provence, p. 51.

Z. Zhao, J. Ye, H. Li, Z. Yan, Extinction of the Dinosaurs across the Cretaceous-Tertiary boundary in Nangxiong Basin, Guandong Province, ds *Vertebrata Palasiatica*, 29, 1, 1991, pp. 13-20.

En ligne (version anglaise après la version chinoise) :

<http://www.ivpp.cas.cn/cbw/gjzdwxb/xbwzxx/200812/W020090813371326742778.pdf>

⁶ Z. Zhao, J. Ye, H. Li, Z. Yan, Extinction of the Dinosaurs across the Cretaceous-Tertiary boundary in Nangxiong Basin, Guandong Province, p. 20.

200.000 à 300.000 ans, cela ne représente quand même que 0,30 % à 0,45 % de 66 Ma, et cela représente donc une marge difficile à appréhender.

également évoqué un accroissement de l'activité volcanique - que l'on a pu mettre en relation avec celui-ci depuis. Dans le Deccan, en Inde, des coulées de lave de plus de 1000 m d'épaisseur couvrent une superficie telle que la matière éjectée aurait pu noyer un pays comme la France sous une couche de plusieurs centaines de mètres. Même si leur émission s'étale peut-être sur un million d'années, en plusieurs épisodes, à chacun d'entre eux il y avait de quoi obscurcir l'atmosphère et abaisser la température générale de la planète de plusieurs degrés. Dans le même sens, on a parfois évoqué la tectonique des plaques. Les mers peu profondes qui jouaient le rôle de régulateur thermique se seraient retirées, abaissant les températures. Dans tous les cas les pauvres bêtes auraient tout simplement... pris un coup de froid, malgré les plumes et duvets dont certains avaient pris la précaution de se couvrir. Mais ces hypothèses se heurtent à la présence d'une forte population de dinosaures à Koonwarra, à environ 145 km au sud de Melbourne, en Australie. Du fait de la dérive des continents, cette région se trouvait en effet au pôle sud à la fin du Crétacé. Il y faisait certes moins froid que de nos jours. L'existence d'une calotte de glace n'est même pas certaine. Mais c'était le pôle, il n'y faisait tout de même pas chaud, et cela montre l'adaptation possible des dinosaures, aussi bien des ornithopodes que des théropodes, à des régions froides ou très froides¹... L'hypothèse d'un retrait des mers peu profondes a suggéré d'autres conséquences. A sa suite en effet, les échanges de faune entre continents se seraient multipliés. Ils auraient mis fin aux équilibres qui existaient précédemment entre les espèces d'un même écosystème continental. Les maîtres du monde auraient finalement payé là le prix de leur adaptation parfaite à un milieu spécifique. En fait, comme c'est très souvent le cas, il y a eu sans doute combinaison de plusieurs facteurs. Il est impossible par ailleurs d'exclure complètement un dérèglement génétique de certaines espèces, amenant leur disparition et une réaction en chaîne. A ce titre, on avait avancé il y a quelques décennies qu'à la fin du Crétacé le nombre des œufs à coquille multiple, formée de plusieurs couches superposées, augmentait sensiblement. Cette anomalie est connue chez les oiseaux et les reptiles actuels. Elle provient d'une rétention de l'œuf avec plusieurs remontées dans l'utérus avant la ponte - et elle a pour résultat d'interdire à l'embryon contenu dans l'œuf de respirer, l'air ne pouvant plus passer à travers la coquille. En 1981, cette théorie a été réfutée². Mais dans le bassin d'Aix, sur des sites où une longue stratigraphie apparaît, comme celui de l'ancienne gare routière (aujourd'hui les Allées provençales), les fouilleurs mentionnaient encore au début des années 2000 l'abondance de ces coquilles multi-stratifiées parmi les œufs attribués à *Hypselosaurus priscus*, dans les couches supérieures de la fin du Crétacé³. Or pour que cela méritât d'être signalé, il fallait d'abord qu'il y en eût un certain nombre et ensuite qu'il y en eût clairement davantage dans ces couches... Le sujet n'est donc peut-être pas clos. Certaines des hypothèses précédentes peuvent se combiner comme on vient de le voir avec le fameux bolide d'Alvarez, l'astéroïde géant qui a créé l'immense cratère d'impact de Chicxulub. On a évoqué là une météorite d'un diamètre de 10 à 14 km, voire 17 km, produisant un cratère de 100 à 200 km de large pour 30 à 40 km de profondeur : il y avait de quoi secouer ! Mais malgré la multiplication actuelle des publications⁴ sur un sujet bien propice à être mis en scène

¹ H. N. Woodward, T. H. Rich, A. Chinsamy, P. Vickers-Rich, Growth Dynamics of Australia's Polar Dinosaurs, ds PLoS ONE, 6, 8, 1er août 2011.

En ligne : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0023339>

² P. Kérourio, La distribution des coquilles d'œufs de dinosauriens multistratifiées dans le Maastrichtien continental du sud de la France, ds Géobios, 14, 1981, pp. 533-536.

Cité par E. Buffétau, Les dinosaures de Provence, p. 51.

³ Communication verbale Y. Dutour et M. Desparoir sur le site, 4 mai 2000.

⁴ D. J. Field, A. Bercovici, J. S. Bery, R. Dunn, D. E. Fastovsky, T. R. Lyson, V. Vajda, J. A. Gauthier, Early Evolution of Modern Birds Structured by Global Forest Collapse at the End-Cretaceous Mass Extinction, ds Current Biology, 28, 11, juin 2018, pp. 1825-1831.

En ligne : [https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(18\)30534-7](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(18)30534-7)

- avec parfois un *timing* minute par minute...¹ - l'extinction des dinosaures semble s'étaler sur un temps trop long pour que l'on puisse considérer le bolide d'Alvarez comme sa cause unique. Il demeure en outre que l'ordre des dinosaures est le seul qui s'est éteint. D'autres formes de vie, *a priori* plus fragiles, ont été épargnées - des mammifères, des oiseaux, des poissons, des batraciens, des échinodermes... pour n'en citer que quelques-uns². Un dérèglement génétique éventuellement conjugué à d'autres facteurs aggravants (dont le bolide d'Alvarez constituerait le plus violent) aurait au moins le mérite d'expliquer comment un ordre entier, sans exception, a disparu, alors que dans les autres certains genres ont survécu. Car c'est bien cela au fond l'énigme de la disparition des dinosaures... Lors de l'extinction de la fin du Permien, des thérapsidés et des diapsidés avaient survécu (notamment les cynodontes et les archosaures). Là, un ordre entier a disparu.

Aujourd'hui l'homme se veut le maître incontesté et définitif de la planète. Mais que représentent les 2,5 millions d'années parcourues depuis l'apparition de sa forme la plus archaïque, *Homo habilis*, au regard d'un règne de 165 millions d'années ? Et que représente réellement toute la technologie dont *Homo (sapiens) sapiens* se prévaut et s'enorgueillit face au déchaînement des éléments qui a mis fin à ce règne ?

1.3.3. Des lacs, des collines, et une forte activité sismique.

Il y a 66 Ma, l'extinction de la fin du Crétacé a sonné la fin de l'ère secondaire. Le Tertiaire qui lui a succédé a vu l'expansion des mammifères, et celle des oiseaux - enfin, leur expansion récente... car les ancêtres des uns et des autres, certaines lignées de thérapsidés et de diapsidés, évoluaient sans doute déjà, respectivement dotés de poils et de plumes, plusieurs dizaines de millions d'années avant qu'apparussent les premiers dinosaures.

Compte-rendu en français : H. Ratel, La météorite tombée sur Terre il y a 66 millions d'années n'a pas tué que les dinosaures, ds Sciences et Avenir en ligne, 01.06.2018.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/la-meteorite-tombée-sur-terre-il-y-a-66-millions-d-années-n-a-pas-tué-que-les-dinosaures_124464

Voir encore :

G.S. Collins, N. Patel, T.M. Davison, A.S.P. Rae, J.V. Morgan, S.P.S. Gulick, IODP-ICDP

Expedition 364 Science Party et Third-Party Scientists, A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact, ds Nature Communications, 11, Article n°1480, mai 2020.

En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41467-020-15269-x>

Compte-rendu en français : Sciences et Avenir avec AFP, Extinction des dinosaures : l'astéroïde fatal aurait suivi la trajectoire la plus dangereuse possible, ds Sciences et Avenir en ligne, 26.05.2020.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/espace/univers/extinction-des-dinosaures-dangereuse-trajectoire-pour-l-asteroide-fatal_144620

A voir aussi pour la qualité des illustrations et des références :

C. Magdelaine et notre-planète.info, Le scénario cataclysmique de l'impact de l'astéroïde qui a entraîné la fin des dinosaures, ds notre-planète.info, 30 juin 2020.

En ligne : <https://www.notre-planete.info/actualites/105-fin-des-dinosaures-impact-asteroide-scenario>

¹ R. A. DePalma, J. Smit, D. A. Burnham, K. Kuiper, P. L. Manning, A. Oleinik, P. Larson, F. J. Maurrasse, J. Vellekoop, M. A. Richards, L. Gurche, and W. Alvarez, A seismically induced onshore surge deposit at the KPg boundary, North Dakota, ds PNAS, 116, 17, avril 2019, pp. 8190-8199.

En ligne : <https://www.pnas.org/content/116/17/8190>

Compte-rendu en français : H. Ratel, Le cataclysme qui mit fin aux dinosaures minute par minute, ds Sciences et Avenir en ligne, 13.05.2019.

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/le-cataclysme-qui-mit-fin-aux-dinosaures-minute-par-minute_133236

L'article original ne prétend toutefois définir que ce qui s'est passé sur un site particulier, situé dans le Dakota, dans une fourchette comprise entre quelques minutes et quelques heures après l'impact.

² En ce sens : Sciences et Avenir avec AFP, Les cinq plus grandes extinctions massives d'espèces, ds Sciences et Avenir en ligne, 29.04.2019 (Extinction de Crétacé).

En ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/paleontologie/extinction-la-terre-a-deja-connu-cinq-episodes-massifs_133317

Au fond, on peut se demander pourquoi ces derniers ont tellement frappé les imaginations, alors qu'ils ne constituent qu'un ordre éteint parmi bien d'autres. Les thérapsidés, par exemple, qui ont régné sur le Permien supérieur, présentent un foisonnement de lignées, de familles, de genres et d'espèces au moins aussi impressionnant que celui des dinosaures, archosaures inclus. Et avant la grande extinction de la fin du Permien, ces thérapsidés offraient suffisamment de monstres (notamment les thériodontes, avec les grands gorgonopsiens tels *Inostrancevia*) pour frapper les esprits. Alors pourquoi les ignorer ? Trop nombreux ? Trop proches des mammifères ? Finalement, en-dehors du gigantisme de certains dinosaures¹, c'est peut-être l'erreur initiale de R. Owen plaçant les dinosaures parmi les reptiles (avec tous les fantasmes que cela a pu engendrer) qui a assuré leur célébrité... Mais en même temps, avec cette célébrité, une grande partie de la faune qui les a précédés (entre autres les proto-mammifères et les autres thérapsidés) a été quasiment rayée du savoir collectif - et c'est dommage, car cela fournit une image faussée de l'Evolution, souvent envisagée d'une manière trop linéaire et trop simpliste.

3.3.1. L'Eocène.

Au Tertiaire en tout cas, pendant le Paléocène et l'Eocène qui se sont étalés entre -66 et -34 millions d'années environ, les conditions de notre région, alors toujours placée près des tropiques, semblent s'être rapprochées souvent de celles de la savane africaine. L'aridification notée en Chine à la fin du Crétacé s'est donc étendue jusqu'à l'île ou l'archipel franco-ibérique en constante recomposition.

Au début de la séquence, au sud du petit Luberon, se trouvait sans doute un vaste lac qui a reçu de nombreux sédiments : entre l'Aumane (commune de Cheval-Blanc) et Méridol, on trouve sur plus d'une centaine de mètres d'épaisseur une alternance de calcaires de marnes argileuses datés du Vitrollien (entre -66 et -56 Ma, pour les marnes les plus profondes) et du Lutétien (-48 à -41 Ma).

Au nord, la région d'Apt apparaissait alors comme une vaste cuvette au sol tropical rougeâtre. Plus tard cette cuvette s'est inondée et transformée en lac². Encore une fois des sables et de la vase, mais aussi de petits cailloux et des galets, charriés par les cours d'eau qui alimentaient ce lac, s'y sont déposés. Et puis quelque chose de nouveau : du sulfate de calcium (peut-être issu partiellement d'un volcanisme ancien du Massif Central) qui dans ce lac allait très vite se transformer en gypse. C'est donc de cette époque que datent les affleurements de gypse et les belles roses des sables que l'on trouve autour de Gargas - ou plutôt que l'on trouvait, car elles sont devenues extrêmement rares en cinquante ans. Autour de cette vaste étendue d'eau vivait à l'Eocène (-56 à 34 Ma), dans une sorte de savane, toute une faune de mammifères pour la plupart retrouvés dans une couche de lignite sur le site de la Débruge à St-Saturnin-lès-Apt, au nord-est de Perréal - dont plusieurs *Paleotherium*, sorte de petits chevaux primitifs³, un *xiphodon*, une sorte de gazelle très gracile apparentée aux camélidés, et des *Hyaenodons* à mi-chemin physiquement entre les félins et les hyènes actuelles. Sur le site on aurait également signalé jadis des primates très anciens (*Adapis parisiensis* et *Microchoerus erinaceus*)⁴. Quand

¹ Les plus grands tyrannosaures pouvaient mesurer plus de 12 m de long pour 4 m de haut et peser 8 à 10 tonnes, tandis qu'*Inostrancevia* avec ses dents de sabre mesurait seulement 3,50 m de long, avec un crâne de 45 cm de long, pour un poids estimé de 400 kg en moyenne...

² C. Balme, Musée de paléontologie du Luberon, Livret guide, Apt, Parc Naturel Régional du Luberon, sans date, p. 19.

³ La famille des paléotheriums a d'abord été, à la suite de Cuvier, associée à des animaux ressemblant à des tapirs (et dotés à ce titre d'une courte trompe) avant que l'on reconnaisse en eux des ancêtres lointains des chevaux. Leur taille variait selon les espèces de 0,75 m pour la majorité d'entre eux à 1,45 m à l'épaule pour l'espèce la plus grande.

⁴ B. Ménouret, Gisements paléontologiques à mammifères ou empreintes de pas de mammifères du Parc naturel régional du Luberon, ds *Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure*, n° 12 - 2013/2014, pp. 56-74, ici pp. 58-59.

on parle de primates, il ne faut pas pour autant imaginer des chimpanzés ou des orangs-outans : il s'agissait de petits animaux (moins d'un kilogramme) ressemblant un peu à des lémuriens, mais des lémuriens diurnes (ils avaient de petites orbites, traduisant de petits yeux adaptés à la lumière du jour) au nez allongé, se nourrissant de feuilles et de fruits, éventuellement d'insectes. Mais aux mains et aux pieds ils possédaient déjà des doigts munis d'ongles au lieu de griffes, qui leur permettaient de saisir des objets.

Leur extinction n'a pas frappé l'imagination autant que celle des dinosaures, mais toutes ces espèces ont disparu - et il allait en être de même de toutes celles qui allaient leur succéder pendant encore des millions d'années : un genre ou une espèce dure environ 6 millions d'années chez les mammifères¹ - et beaucoup moins pour ces dernières chez les hominiens ou les hominidés.

Mais nous n'en avons pas fini avec la géologie de l'Eocène : à la suite de la collision de la plaque africaine et de la plaque européenne vers - 70 Ma, c'est en effet à la fin de cette période (autour de -40 Ma) que s'est produit le plissement pyrénéo-provençal, de direction est-ouest, qui est à l'origine des chaînes de la Sainte-Victoire, du Ventoux, de Lure, des Monts de Vaucluse et du Luberon. Dans la région le mouvement a eu une ampleur relativement faible - juste suffisant pour dessiner des lignes de collines, et créer aussi une série de longues fractures dans les roches du Crétacé, déjà vieilles et devenues très rigides. Comme tous les massifs participant de ce mouvement, le Luberon accuse une importante dissymétrie entre ses versants méridionaux et septentrionaux, ces derniers étant nettement plus abrupts. C'est pourquoi cet ouvrage devrait embrasser un champ moins étendu au nord du massif qu'au sud de celui-ci. Mais il faut élargir ce champ pour tenir compte des réalités humaines. Au sud la Durance a souvent fourni une limite, mais au nord le Calavon a simplement servi de fil conducteur à travers un pays présentant une assez grande unité. La prise en compte de cette donnée nous entraînera donc bien au-delà des contreforts septentrionaux du Luberon, et parfois même jusqu'aux pentes de Lure.

3.3.2. L'Oligocène, des grès verts aux lamines calcaires.

Entre -34 et -23 Ma l'Oligocène qui a succédé à l'Eocène a conservé une teinture très exotique dans ses débuts, qui s'est bien modifiée par la suite.

En fait, on parle souvent de la Grande Coupure de l'Eocène-Oligocène. Pendant le premier, le climat de la planète était encore globalement très chaud. Les températures semblent avoir culminé vers -40 Ma. A partir de -34 Ma, elles ont baissé progressivement jusqu'à se rapprocher parfois des températures modernes (sous même latitude car il faut également compter avec la dérive des plaques tectoniques). Les raisons de cet abaissement global des températures seraient à rechercher dans une forte activité éruptive engendrant des successions d'hivers volcaniques (séquences pendant lesquelles les cendres émises par les volcans obscurcissent l'atmosphère). Mais l'abaissement du taux de CO₂ contenu dans l'atmosphère, lié à l'altération des silicates sous climat chaud, a également été mis en avant. Les silicates représentent en effet plus de 95 % des roches et leur altération, accrue par la chaleur, peut avoir des répercussions importantes. Entre autres, grâce à la mise en solution dans l'eau d'ions calcium, magnésium, sodium,

En ligne : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/58152/CS_2013_12_56.pdf?sequence=1

Sur les premiers travaux, voir en particulier P. Gervais, Nouvelles recherches relatives aux Mammifères d'espèces éteintes qui sont enfouis auprès d'Apt, avec des Paléothériums identiques à ceux de Paris, ds Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), 30, 1850, pp. 602-604 (plusieurs paléothériums, un anoplothérium, un xiphodon, un hyaenodon,) .

En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2987x/f1.image.vertical>

¹ R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, p. 391.

A l'étage au-dessus des espèces, une famille de dinosaures ou de mammifères dure 25 Ma, une famille de reptiles 55 Ma environ.

potassium, ou fer ferreux, elle se trouve liée à la formation d'une grande partie des roches évaporitiques. L'altération des silicates n'est donc pas étrangère à l'installation de couches de gypse dans la vallée d'Apt à l'Eocène, non plus qu'à celle de sables verts et leur transformation en ocre au Crétacé. Quoi qu'il en soit, les répercussions du changement climatique ont été sensibles sur les espèces animales et végétales. Certaines grandes familles très abondantes à l'Eocène ont disparu, tandis qu'en apparaissaient d'autres bien plus proches de celles que nous connaissons - et parfois même quasi-identiques à celles-ci. C'est en ce sens que l'on parle de Grande Coupure.

Les débuts de l'Oligocène, encore très exotiques, sont riches. Datées de la deuxième partie du Sannoisien (ou Rupélien, -34 à -28 Ma)¹, soit approximativement entre -31 et -28 Ma, de vastes dalles calcaires conservaient au-dessus de Carlet (sur le site de l'ancienne carrière Négri) au nord-est de Saignon, diverses séries d'empreintes animales². Comme pour les empreintes du Permien et du Jurassique évoquées plus haut, il faut distinguer dans les études les genres et espèces d'empreintes (qui définissent les types de celles-ci) des genres et espèces d'animaux auxquelles elles se rapportent éventuellement et que l'on connaît par des fossiles directs (ici des ossements). A Carlet, on a donc des empreintes à trois doigts baptisées *Rhonzotherichnus voconcense* qui sont très vraisemblablement celles de *Ronzotherium velaunum*³. C'est le premier animal de la famille des rhinocéros qui a remplacé celle des paléothériums dans la première partie du Sannoisien⁴. A Viens on a retrouvé d'autres empreintes qui lui ont été attribuées, et une mandibule qui a permis de le définir⁵. C'était un animal de 1,80 à 2,40 m de long pour 1,3 à 1,7 m de haut au garrot, sans corne malgré son appartenance à la famille des rhinocéros. Sur le site de Carlet il y avait aussi d'autres traces appartenant à un genre d'empreintes indéterminé mais que l'on pourrait attribuer à un autre membre de la famille des rhinocéros, également inconnu, mais plus gros que *Ronzotherium velaunum* (2,20 à 2,80 m de long)⁶. On a également trouvé une série de traces présentant deux sabots qui se rattachent au genre d'empreintes baptisé *Bifidipes* et plus précisément à l'espèce *Bifidipes velox*. On avait d'abord pensé rapprocher celle-ci d'un animal du genre d'*Anoplotherium*, regroupant de petits herbivores à longue queue. Par

¹ Plus récemment, dans un souci de simplification, le Sannoisien (également souvent appelé Stampien) a en effet été nommé Rupélien. On qualifie aujourd'hui ce contexte de MP23 et on le situe autour de -31 Ma : L. Costeur, O. Maridet, O. Lapuze, B. Mennecart, L. Xiaoyu, R. Roch, J. Tissier, D. Vasilyan, C. Balme, S. Legal, Le gisement oligocène de Murs, une histoire centenaire culminant sur des fouilles prometteuses, ds Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure, 15, 2019, pp. 58-69, ici p. 67.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/335401349_Le_gisement_oligocene_de_Murs_une_histoire_centenaire_culminant_sur_des_fouilles_prometteuses/link/5d63d3b992851c619d773f8a/download

² G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), ds Bulletin du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, Série 4, Section C, tome 6, n° 2, 1984, pp. 153-183 (p. 154 pour la datation).

En ligne :

https://bibliotheques.mnhn.fr/EXPLOITATION/infodoc/ged/viewportalpublished.ashx?eid=IFD_FICJOINT_BMCTE_S004_1984_T006_N002_1

³ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), pp. 154-161.

⁴ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), p. 154.

⁵ Traces : C. Bessonat, H. R. Dugui, F. Sirugue, Un important gisement d'empreintes de pas dans le Paléogène du Bassin d'Apt-Forcalquier, ds Comptes Rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Paris, série D, 268, 1969, pp. 1376-1379. - G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), p. 173.

Mandibule : G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), Annexe p. 175.

⁶ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), p. 161.

la suite on a plutôt pensé judicieux de la rapporter au genre fossile des gelocidés, et peut-être à l'espèce *Gelocus communis*¹, une sorte de toute petite gazelle aux jambes très fines, taillée pour la course ou la fuite. Elle serait assez proche des chevrotains modernes qui mesurent selon les espèces entre 45 et 80 cm de long. Ce sont de drôles de petites gazelles. Ils portent en effet parfois des canines supérieures saillantes et certaines espèces se nourrissent, en plus de fruits et de feuillages, de poissons chassés sous l'eau... *Gelocus communis* n'est toutefois généralement daté que de l'Oligocène supérieur. Le spécimen de Carlet serait donc un spécimen très ancien de l'espèce, et peut-être même le plus ancien. Un peu plus loin, on verra qu'un autre site fournit peut-être une alternative intéressante. Sur le site de Carlet, on a encore décelé une trace à cinq doigts, aux doigts latéraux placés très en arrière. Elle a été attribuée à un genre d'empreintes baptisé *Sarcotherichnus enigmaticus*. Elle présentait quelques analogies avec l'empreinte d'un tatou, mais bien davantage avec celle d'un *Hyaenodon* (famille des créodontes)² et c'est à cet animal qu'elle a finalement été reliée. Enfin, on a reconnu à Carlet un grand nombre de traces laissées par des oiseaux. Les plus lisibles, en forme de T renversé, ont été rattachées à l'espèce (d'empreintes) *Pulchravipes magnificus*³ - elle-même identifiée comme appartenant à un oiseau des rivages de taille moyenne, aux pattes relativement courtes, quelque chose entre une bécasseau et un chevalier modernes. Tous deux appartiennent à un ordre (les ciconiiformes) qui recouvre des oiseaux de rivage archaïques. Il est donc possible que *Pulchravipes magnificus* ne fût finalement guère différent de ces deux espèces modernes. Du fait du contexte, on a toutefois également envisagé la possibilité d'un petit ibis. Les deux gisements de Carlet et de Viens évoquent en effet de vastes étendues lacustres, aux abords plus ou moins végétalisées. A la saison sèche, ces rives s'asséchaient très rapidement et la boue mise à nu durcissait en quelques jours, permettant aux animaux qui parcouraient ces zones à la recherche de nourriture ou d'eau d'y laisser leurs traces. Tout autour régnait une savane plus ou moins arborée. Quoique relativement exotique, cela peut paraître assez moderne. Mais ici ou là un indice vient nous rappeler que ça ne l'est pas du tout, et que plusieurs dizaines de millions d'années se sont écoulées. Dans quelques cas, le fond de l'empreinte s'est ainsi rempli de silice qui s'est transformée en un rognon de silex épousant plus ou moins sa forme⁴.

Il y a bien d'autres sites du Rupélien/Sannoisien/Stampien (ou plus précisément de l'horizon MP23 que l'on situe autour de -31 Ma)⁵ dans la région. A Murs, deux gisements de sables et de grès verts⁶ situés à environ 200 mètres l'un de l'autre, ont fourni des restes de *Lophiomeryx*

¹ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), pp. 162-166.

² G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), pp. 167-168.

³ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), pp. 168-172.

⁴ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), p. 160.

⁵ L. Costeur, O. Maridet, O. Lapuze, B. Mennecart, L. Xiaoyu, R. Roch, J. Tissier, D. Vasilyan, C. Balme, S. Legal, Le gisement oligocène de Murs, une histoire centenaire culminant sur des fouilles prometteuses, ds Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure, 15, 2019, pp. 58-69, ici p. 67.

En ligne :

https://www.researchgate.net/publication/335401349_Le_gisement_oligocene_de_Murs_une_histoire_centenaire_culminant_sur_des_fouilles_prometteuses/link/5d63d3b992851c619d773f8a/download

⁶ Sur ces sites, et leur faune : L. Costeur, O. Maridet, O. Lapuze, B. Mennecart, L. Xiaoyu, R. Roch, J. Tissier, D. Vasilyan, C. Balme, S. Legal, Le gisement oligocène de Murs, une histoire centenaire culminant sur des fouilles prometteuses, ds Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure, 15, 2019, pp. 58-69.

On peut voir également J. A. Rémy, *Plagiolophus huerzeleri*, une nouvelle espèce de *Paleotheriidae* (*Perissodactyla*, *Mammalia*), de l'Oligocène inférieur (Rupélien, MP 23) à Murs (Vaucluse, France), ds Geobios, 33, 4, 2000, pp. 489-503. - B. Ménouret, Gisements paléontologiques à mammifères ou empreintes de

mouchelini (anciennement *Lophiomeryx chalaniati*), une sorte de petite gazelle assez proche de *Gelocus communis*. Cela invite à s'interroger sur la pertinence du rattachement à cette espèce des traces de *Bifidipes velox* : leur attribution à *Lophiomeryx chalaniati* réglerait notamment le problème de chronologie posé par un *Gelocus communis* de l'Oligocène inférieur. Aux côtés de ses restes, on a également découvert ceux d'*Entelodon*, un gros mammifère fossile qui a vécu de la fin de l'Eocène jusqu'au Miocène (entre -36 et -23 Ma environ). C'était une sorte de grand sanglier primitif assez haut sur pattes - ou plutôt de phacochère, car il portait des excroissances osseuses sur les joues et la mâchoire inférieure. Sur ces sites très riches de Murs, connus depuis près d'un siècle, on a aussi reconnu des vestiges d'*Anthracotherium*, un mammifère fossile considéré comme omnivore, peut-être semi-aquatique. On pourrait situer son aspect entre le phacochère et l'hippopotame. Il y avait également des ossements assez abondants pour y définir l'espèce *Plagiolophus huerzeleri*. Connue entre la fin de l'Eocène et le début de l'Oligocène (entre -45 et -30 Ma environ), c'était un animal de la famille des paléothériums. On rencontre aussi à Murs deux rhinocéros sans cornes : *Molassitherium delemontense*, d'assez petite taille, et notre bon vieux *Ronzotherium*. L'association avec un animal de la nombreuse famille des paléothériums est très intéressante, les rhinocéros ayant globalement occupé la niche écologique de cette famille au début de l'Oligocène¹. D'abord cela permet d'envisager qu'il y a eu un moment concurrence entre les deux familles, et non simplement réoccupation d'une niche désertée par une famille éteinte. Et ensuite, compte tenu de la chronologie assez précise de l'horizon MP23, vers -31 Ma, cela permet de situer le moment de cette concurrence. Sur le site de Murs où l'on a récemment repris les fouilles (2017-2019) on connaît encore un carnivore, *Aelurictis*, rebaptisé avec quelques hésitations *Nimravus*. Ce dernier était un félin à dents de sabre, de la taille d'un léopard actuel, qui vivait à cette époque entre l'Amérique du Nord et l'Europe. Enfin, le site a livré les restes d'un rongeur (*Blainvillimys helmeri*) et plusieurs espèces impossibles à déterminer pour le moment, mais dont la nature a pu être précisée : un oiseau, trois tortues, un poisson et... un crocodile. Ces deux derniers nous éclairent un peu sur la nature du lieu. La position stratigraphique relative des deux sites de Murs, situés à 200 m environ l'un de l'autre, n'a pas pu être établie. Mais on a pu conjecturer qu'ils se trouvaient en bordure d'une rivière puissante, coulant dans un relief peu accusé autorisant de nombreux bras ou chenaux au fond garni de sables assez grossiers. Les restes d'animaux retrouvés seraient donc des carcasses charriées par la rivière, qui se seraient déposées au fond de ses divers bras, et qui auraient rapidement été recouverts².

Un peu plus tard dans l'Oligocène, on peut signaler le site des Chapelins, à 3,5 km au nord-est de Bonnieux, qui a fourni de nombreux fossiles de rongeurs et deux reptiles (lézard et crocodile). En 2014, B. Ménouret l'a attribué au Chattien qui correspond à l'Oligocène supérieur (-28 à -23 Ma). Le site qui pourrait se rattacher au début de cette période est intéressant car il recèle en outre un grand nombre de fossiles de poissons, d'insectes et de végétaux pris entre des plaquettes de calcaire³. Ces dernières (que l'on nomme également lamines) appellent quelques commentaires.

Vers - 35 Ma les effets de la collision entre la plaque africaine et la plaque européenne (qui s'était produite vers -70 Ma, et qui avait déjà provoqué le plissement pyénéo-provençal vers -40 Ma) ont continué à se faire sentir. C'étaient cette fois les prémices de la formation des Alpes.

pas de mammifères du Parc naturel régional du Luberon, ds Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon et de la Réserve de biosphère Luberon-Lure, n° 12 - 2013/2014, pp. 56-74, ici pp. 59-60.

En ligne : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/58152/CS_2013_12_56.pdf?sequence=1

¹ G. Demathieu, L. Ginzburg, C. Guérin, G. Truc, Etude paléontologique, ichnologique et paléoécologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), p. 154.

² L. Costeur, O. Maridet, O. Lapuze, B. Mennecart, L. Xiaoyu, R. Roch, J. Tissier, D. Vasilyan, C. Balme, S. Legal, Le gisement oligocène de Murs, une histoire centenaire culminant sur des fouilles prometteuses, p. 65.

³ B. Ménouret, Gisements paléontologiques à mammifères ou empreintes de pas de mammifères du Parc naturel régional du Luberon, p. 60.

Dès l'Oligocène inférieur, le socle géologique de la région a subi des contraintes énormes. Par endroits, sous l'effet de violents séismes, le vieux socle du Crétacé s'est rompu et s'est enfoncé brutalement, créant les fossés d'effondrement de Sault, Banon, Murs, Lioux et plus à l'est le grand bassin de Manosque le long de la faille de la Durance. Ces cuvettes envahies par des lacs ont reçu plusieurs centaines de mètres d'épaisseur de sédiments. Cela recouvre des horizons chronologiques bien distincts, correspondant à des contextes climatiques très différents. Mais il y a une constante : les pluies devaient être abondantes et fréquentes. Les sédiments se sont donc empilés en fines plaquettes (les fameuses lamines) pendant des millions d'années. Les organismes qui se déposaient au fond après leur mort dans le cas de poissons - ou que la pluie précédente avait entraînés jusque-là, dans le cas d'animaux terrestres ou de végétaux - se sont ainsi retrouvés mis "sous presse" entre deux couches alluviales, elles-mêmes écrasées par la masse des autres couches venant s'accumuler par-dessus. Le résultat est une roche par endroits extrêmement riche en fossiles, en particulier vers le nord et l'est du Luberon. On peut y voir autour de Montfuron des feuilles de saule, d'érable, d'orme, de chêne, de laurier, de romarin, des aiguilles de pins, de genévrier ou de cade - pour ne citer que quelques-uns parmi les plus beaux végétaux qu'ils renferment - mais aussi des mouches, des moustiques, des libellules, des grenouilles ou des lézards, sans oublier d'extraordinaires bancs de poissons. Le vieux cantonnier de Montfuron en possédait il y a quelques décennies des exemplaires extraordinaires dans un petit musée qu'il avait constitué - et qui a malheureusement été pillé après sa mort.

Le contexte des plantes que nous venons d'énumérer à Montfuron, plus récent qu'à Carlet ou à Murs, est également beaucoup moins exotique. Mais on trouve un peu toutes les étapes de la transformation du climat : on découvre donc également entre les lamines des branches de palmiers qui voisinent avec les restes de crocodiles ou de tortues. Le problème, c'est le manque de stratigraphie qui interdit de situer assez précisément tel ou tel fossile dans une échelle chronologique et d'établir un lien entre ceux de même époque. Il semble toutefois que le changement se soit dessiné assez tôt : dans des lamines rattachées aux calcaires dits de la Fayette (dans lesquels s'inscrivent par ailleurs les traces de Carlet) on trouve déjà des feuilles de saule¹... C'est encore entre des plaquettes de l'Oligocène que l'on a retrouvé le joli petit *Bachitherium* de Vachères². Lointain parent de nos ruminants et cousin des chevrotains actuels, il était muni comme ces derniers de deux longues canines qui pouvaient lui servir tout aussi bien pour se défendre que pour se battre avec les autres mâles lors des joutes précédant les accouplements. Comme les chevrotains actuels il les utilisait peut-être aussi pour chasser les poissons qui pouvaient agrémenter son menu. Dans les lamines de Vachères comme dans celles de Céreste, on a également trouvé des chauve-souris³, mais sans que l'on puisse les situer chronologiquement par rapport au *Bachitherium* - ni d'ailleurs entre elles, même si elles appartiennent toutes deux à la famille des tadaridés.

La fin de l'Oligocène semble avoir été marquée par de forts séismes, vers -25 millions d'années. Marquant dans la région le début du soulèvement des Alpes, ils ont à nouveau fracturé les calcaires crétacés qui avaient déjà été exhaussés et rompus par le plissement pyrénéo-provençal (Eocène supérieur) ainsi que par les divers mouvements provoquant les bassins d'effondrement de la région (Oligocène inférieur).

¹ Carte géologique à 1/50 000, Reillanne, XXXII-42, Orléans, (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) B.R.G.M., 1966 (1974), Notice explicative, p. 7.

En ligne : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0968N.pdf>

² D. Geraads, G. Bouvrain, J. Sudre, Relations phylétiques de *Bachithérium* Filhol, ruminant de l'Oligocène d'Europe occidentale, ds *Paleovertebrata*, Montpellier, 17, 2, juin 1987, pp. 43-73.

En ligne : https://palaovertebrata.com/Articles/sendFile/271/published_article
Ensemble des archives *Paleovertebrata* : <https://palaovertebrata.com/archives>

³ B. Ménouret, Gisements paléontologiques à mammifères ou empreintes de pas de mammifères du Parc naturel régional du Luberon, p. 63. - D. Geraads, G. Bouvrain, J. Sudre, Relations phylétiques de *Bachithérium* Filhol, ruminant de l'Oligocène d'Europe occidentale, p. 45.

1.3.4. Le retour de la mer... et son retrait, deux fois encore.

Le Miocène (-23 à -5 millions d'années environ) a vu le grand retour de la mer, après une absence de plusieurs millions d'années : au début du Burdigalien, entre -23 et -16 millions d'années, le Luberon est (re)devenu une île formée d'une longue ligne de collines.

Géologiquement c'est une période riche et complexe. C'est pendant le Miocène que les éléments qui manquaient encore à la structure générale du Luberon, telle que nous la connaissons, sont venus se rajouter, sous forme de sédiments, aux vieux matériaux du Néocomien, de l'Urgonien, de l'Eocène et de l'Oligocène. C'est encore une époque d'intenses mouvements telluriques. Le Miocène en effet a vu en effet la poursuite du soulèvement (ou surrection) des Alpes qui avait débuté vers -25 Ma par une fracassante série de séismes. C'est même là que se situe sa phase la plus active, entraînant un nouveau retrait de la mer à partir de -15 Ma¹. Ces mouvements se sont accompagnés de séismes - et jusque, dans certains cas, de volcanisme (dans la région d'Aix) ou d'intrusions de lave (dans le Luberon et la montagne de Lure). A Beaulieu, entre Rognes et le Puy-Sainte-Réparate², le volcanisme a pris la forme d'un cratère plat, sans cône, probablement né d'une explosion provoquée par la rencontre de la lave avec de l'eau (éruption phréato-magmatique)³ ou alors de la remontée d'une lave fluide, de type hawaïen. Il a pu être daté des environs de -18 Ma⁴. Cela correspond au début de la phase active du plissement alpin, qui a commencé à la fin du Burdigalien. Dans le Luberon, c'est plus discret. L'intrusion de lave de Peypin d'Aigues se remarque à peine dans un virage de la piste D.F.C.I. qui relie la Bastide du Bois aux Méritans. Elle abrite pourtant, comme à Beaulieu, de jolis petits cristaux verts (peut-être d'olivine ou plutôt de pyroxène). Même si elles n'ont fait parfois qu'écarter les lèvres de fractures éocènes et oligocènes, de véritables crevasses se sont donc formées ici ou là. Le magma les a envahies sous des formes diverses : sans doute relativement liquide à Beaulieu, compact et très visqueux à Peypin-d'Aigues... Les blocs de lave basaltique où s'anime parfois la lueur glauque des olivines ou celle plus brillante des pyroxènes offrent donc un beau témoignage des forces gigantesques qui se sont exercées jusqu'à la périphérie de la chaîne alpine, lors de la naissance de celle-ci. Mais l'intrusion de lave de Peypin d'Aigues reste un épiphénomène dans les grandes transformations que le Luberon en gestation a vécues au Miocène.

Tandis qu'il s'élevait peu à peu, dans une première séquence (pendant le Burdigalien supérieur, entre -20 et -16 Ma) se sont déposés des sédiments qui forment au nord une fine ligne discontinue de Montjustin jusqu'à Oppède. Dans la partie centrale une énorme accumulation de ces sédiments a fourni la matière du plateau des Claparèdes (de Castellet à Bonnieux). Celui-ci se poursuit sans interruption notable, à l'ouest/nord-ouest, par le bloc massif qui s'étend de la Baconnade-Trigaut (Bonnieux) jusqu'aux Artèmes (Ménerbes) et au-delà aux Beaumettes, aux Bouilladoires, aux Luquets, à Sénanque, au village de Gordes et à celui de Cabrières d'Avignon. C'est cette roche relativement tendre, grise clair ou jaune pâle, se teintant volontiers d'orangé lorsqu'elle s'oxyde, qui forme les falaises de Buoux et le rocher du Fort sur lesquels nous reviendrons très souvent dans ces pages.

¹ Par exemple C. Balme, G. Clauzon, M. Denis, M. Dubar, P. Gigot, J.-L. Guendon, S. Legal, M. Liouville, J.-P. Masse, L. Moutier, J. Nicod, D. Nury, M. Philippe, E. Salesse, J.-M. Triat, Découverte géologique du Luberon, Paris/Apt, BRGM/Parc naturel régional du Luberon, 1998, p. 16.

² 4 km environ à l'est/sud-est de Rognes et 4 km à l'ouest/sud-ouest du Puy-Sainte-Réparate.

³ Dans la Chaîne des Puys (Massif Central) c'est également le cas du lac Pavin, mais là l'explosion a laissé un creux que l'eau a pu remplir ultérieurement alors qu'à Beaulieu la lave aurait occupé tout l'entonnoir formé par l'explosion.

⁴ Voir par exemple A. Cerdan, C. Monier, N. Romeuf, Bassin d'Aix, Secteur central, Basalte de Beaulieu, ds C. Marcel, A. Faralli (dir.), Lithothèque PACA.

En ligne : http://www.lithotheque.ac-aix-marseille.fr/Affleurements_PACA/13_bassin_aix/13_bassin_aix_central_beaulieu2.htm?loc=67

PI 03 : DES MÉTHODES DE DATATION TOUJOURS PLUS NOMBREUSES ET PLUS PRÉCISES.

Dater les couches archéologiques et les objets découverts est indispensable pour établir une chronologie qui dépasse le cadre d'un site. Pendant longtemps cela a posé un réel problème. Aujourd'hui les méthodes de datation de plus en plus nombreuses et performantes contribuent à le résoudre en partie.

L'observation et la mesure sur le terrain demeurent très importantes.

La **stratigraphie** reste bien sûr fondamentale. Lorsque les couches n'ont pas été bouleversées (par des fouilles clandestines par exemple) les plus anciennes se trouvent au fond et les plus récentes au sommet. Mais cela ne fournit qu'une chronologie relative.

La **sériation** vient en complément. Sur un site elle permet par exemple de comparer le pourcentage de répartition d'un objet dans plusieurs niveaux, et de définir une courbe théorique d'utilisation de cet objet. Cela peut permettre de positionner le matériel retrouvé à l'intérieur d'un des niveaux par rapport à cette courbe, et d'établir une sous-stratigraphie théorique à l'intérieur de la stratigraphie générale.

La **typochronologie** permet parfois d'affiner la stratigraphie lorsque l'on a du matériel très précisément daté (dans le cas de céramiques d'importation de l'âge du fer par exemple, ou de monnaies).

Les techniques de datation relèvent cependant pour la plupart du laboratoire.

La **dendrochronologie** étudie les cercles de croissance dans le tronc des arbres, plus ou moins larges selon les années. Cela permet de définir une courbe pour chaque vieil arbre conservé (dans les charpentes ou bien dans les tourbières pour les plus anciens) et par chevauchement des extrémités de la courbe de chaque arbre, une courbe générale. Aujourd'hui on peut faire remonter ces datations jusque vers 10.000 ans avant notre ère.

Les **techniques isotopiques** sont plus connues. Elles utilisent le fait que les isotopes instables de certains éléments chimiques évoluent selon une périodicité connue et de manière *a priori* régulière - *a priori* seulement car pour certains d'entre eux, il peut exister des interférences (avec l'activité solaire par exemple pour le plus connu d'entre eux, le carbone 14 ou ^{14}C). Ces techniques isotopiques permettent d'appréhender des durées différentes.

Le **carbone 14** (transformation du carbone 14 en carbone 12, ordinaire) que l'on vient d'évoquer a une périodicité de 5.730 ans en moyenne, c'est-à-dire que la quantité de cet isotope diminuerait de moitié tous les 5.730 ans \pm 40 ans sans interférences. Celles-ci imposent une correction, ou calibration, qui a été mise lentement au point, notamment en s'appuyant sur la dendrochronologie. Aujourd'hui le carbone 14 permet des datations jusqu'à -45.000 ans environ sur les restes de matériel vivant (os, bois).

Le **couple uranium-thorium** (transformation de l'uranium 234 en thorium 230) s'applique pour sa part au calcaire issu de l'eau (coquillages, foraminifères, coraux, stalactites, stalagmites). Son champ de validité s'étend de 10.000 à 350.000 ans environ.

Le **couple potassium-argon** (transformation du potassium 40 en argon 40) s'applique aux roches d'origine volcanique. Il peut fournir des résultats entre 100.000 et 10 millions d'années (10 Ma).

D'autres méthodes utilisent les propriétés spécifiques de certains matériaux.

L'**archéomagnétisme** utilise les propriétés du champ magnétique terrestre et de l'argile : Le premier a varié dans le temps et lorsqu'elle est chauffée, la seconde garde l'empreinte du champ magnétique au moment de cette cuisson volontaire ou involontaire. Mais il faut que l'argile n'ait pas été déplacée depuis l'événement, ce qui restreint considérablement le champ d'application. En théorie, la méthode permet de dater des événements jusqu'à 100.000 ans environ au maximum. On peut également utiliser l'archéomagnétisme pour les coulées de lave qui contiennent des particules ferreuses.

La **thermoluminescence** s'applique aux matériaux cristallins. Avec le temps, sous l'effet de divers rayonnements, certaines de leurs particules se trouvent modifiées. Or quartz et feldspaths présentent des défauts de structure qui piègent ces particules - et si on les chauffe, celles-ci retrouvent leur état originel en émettant de la lumière. Lorsque du silex a été chauffé (accidentellement ou intentionnellement pour faciliter sa taille) cet épisode a remis le compteur à zéro. En mesurant la quantité de particules modifiées qu'il contient, on peut estimer à quel moment cela s'est passé. La méthode est utilisable jusque vers -200.000 ans.

La **résonance paramagnétique électronique** repose également sur les défauts cristallins, ainsi que la capacité de certains électrons à absorber l'énergie d'un rayonnement électromagnétique et à la restituer lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique intense. Sous diverses formes, c'est le calcium qui est ici utilisé. On peut utiliser la méthode pour dater des os, des dents, mais aussi des sédiments, des coquillages, des coraux les concrétions calcaires des grottes (comme l'uranium-thorium). Elle peut être efficace entre 200.000 ans et 1 Ma pour la calcite, 5 Ma pour les os et les dents.

Certaines techniques peuvent être utilisées très ponctuellement en fonction de la nature du site.

La **fuligochronologie** a ainsi été mise au point à partir du concrétionnement et du délitement continu des parois de la grotte Mandrin à Malataverne dans la Drôme. Le délitement a offert des tranches de concrétions ayant piégé des couches de suie. Celles-ci correspondent chacune à un épisode de feu allumé par les humains qui ont fréquenté la grotte. Cela se rapproche de la dendrochronologie. De la sorte, à l'intérieur d'un cadre fourni par méthode isotopique, près de 450 occupations successives de l'abri ont pu être identifiées, avec une résolution temporelle sub-annuelle à décennale. Rapportées à la stratigraphie générale du site, cela permet de préciser le champ d'autres méthodes, par exemple de la sériation.

Enfin, des méthodes scientifiques totalement extérieures à la datation peuvent parfois venir en aide à celle-ci.

Dans les Pyrénées, une étude portant sur la nature des pigments utilisés pour décorer grottes et objets du quotidien - faisant appel à un instrument de **spectrométrie de fluorescence X** inspiré d'un matériel embarqué par la mission Pathfinder sur la planète Mars - a ainsi montré que le même pot de peinture avait été utilisé à la grotte de la Vache et dans la grotte de Niaux. Or un pot de peinture fabriqué ponctuellement avec des pigments ne pouvait guère être reproduit de manière semblable par un artiste préhistorique, et il n'avait en outre qu'une durée de vie très limitée. Cela n'a rien apporté quant à la datation absolue des deux sites (celle de la Vache avait été datée de 10.500 à 11.500 avant notre ère) mais cela a extraordinairement mis en évidence leur fréquentation simultanée par le même groupe humain - avec une précision qu'aucune méthode de datation n'aurait pu fournir. A Niaux on est allé plus loin. D'autres représentations rupestres ont en effet révélé la parenté de leur peinture avec celle qui avait été utilisée dans la grotte d'Enlène à Montesquiou-Avantès, située à une quarantaine de kilomètres... et dont l'occupation a été datée d'un millénaire ou deux avant celle de la grotte de la Vache. Avec cette nouvelle contemporanéité, c'est la longue durée de fréquentation de Niaux qui a été démontrée.



Au cours d'une deuxième séquence, de nouveaux sédiments sont venus se déposer de part et d'autre du massif pendant l'Helvétien (-16 à -11,5 Ma, souvent appelé aujourd'hui Langhien-Serravalien).

Au sud, ce sont les molasses qui forment la barre de falaises de Puget, Lauris, Cadenet ainsi que les vastes étendues à sables grossiers plus ou moins marneux qui constituent le large piémont incliné du pays d'Aigues, souvent recouvert de sédiments ou d'éboulis plus récents. Au nord, c'est le massif de molasse gréseuse qui s'étend autour de Ménerbes.

Pendant une troisième séquence, au Tortonien (-11,5 à -7 Ma) qui a succédé à l'Helvétien se dessinent deux phases. La première, marine, a vu s'accumuler les sédiments qui ont donné naissance aux molasses des barres rocheuses de Vaugines et de Cucuron, et plus au sud aux assises des collines des Gardis et du Castellar à Cadenet ou encore de Trésémines à Villelaure. C'est un calcaire qui atteint 70 m d'épaisseur, très fossilifère. On y découvre (ou découvrait) facilement des huîtres, des coquilles Saint-Jacques, des pétoncles, des palourdes, des tellines, des cônes, des cérithes et des turritelles, divers autres escargots de mer, ainsi parfois que des dents de requins de différentes formes et tailles correspondant évidemment à diverses espèces¹. La seconde partie du Tortonien, lacustre, a laissé beaucoup moins de traces.

Enfin, une dernière séquence miocène, continentale cette fois, le Messinien (de -7 à -5,3 Ma) offre également deux temps. Le premier temps a vu se déposer une couche plus ou moins épaisse de galets de nature très différente (calcaire, quartz, quartzite)². On les trouve parfois libres (notamment au sommet des collines qui bordent la Durance de Pertuis à Puyvert)³ parfois agglomérés en un poudingue (plus bas sur ces mêmes collines, ou à Puget par exemple où l'on trouve leur affleurement le plus aval)⁴. Une partie du matériau (quartz ou quartzite) est d'origine alpine. Elle doit être rattachée à une Durance archaïque à qui le soulèvement des Alpes a donné son lit, le long des grandes failles liées à l'activité sismique intense de l'Oligocène. Ces galets se sont probablement accumulés au début du Messinien à l'emplacement d'un ancien lac⁵ probablement bordé de marécages, alors que le plissement alpin n'était pas achevé⁶. Dans un second temps se sont déposés des cailloutis plus anguleux, soudés dans les parties basses en une brèche⁷, que l'on trouve notamment de Cucuron à la colline Saint-Médard, entre Pertuis et la Bonde - où la brèche surmonte clairement le poudingue⁸. Le matériau de cette brèche provient ici très majoritairement de l'épaisse couche de calcaire néocomien qui constitue, comme on l'a vu, le matériau principal du Luberon⁹. Ces dépôts sont donc liés à une forte érosion des flancs du Luberon. On pourrait la mettre en relation avec l'épisode messinien qui a donné son nom à la période. Ce n'est pas rien. Entre -5,8 et -5,3 Ma en effet la Méditerranée s'est trouvée provisoirement fermée. Le niveau de cette mer intérieure¹⁰ s'est alors abaissé de près de 1500 mètres. Le profil d'équilibre des cours d'eau s'en est trouvé profondément modifié, et ils ont creusé de profonds canyons - généralement le long de failles (lignes de fracture de l'écorce terrestre). Comme la Durance, l'Aiguebrun mais aussi le Régalon se sont enfoncés dans le

¹ Les plus petites mesurent moins de 10 mm, mais on peut en trouver qui atteignent 55 voire 60 mm.

² J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, 5, 2, 1964. pp. 109-132, ici p. 114.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/medit_0025-8296_1964_num_5_2_1117

³ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, pp. 111, 112, 115, 116.

⁴ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, p. 116.

Un poudingue est un conglomérat dont les éléments sont arrondis (galets par exemple). Une brèche est un conglomérat dont les éléments sont anguleux.

⁵ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, p. 114.

⁶ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, p. 113.

⁷ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, p. 114.

⁸ J. Gabert, Le Piedmont Central du Luberon, ds Méditerranée, p. 113.

⁹ Ici du Valanginien qui a précédé l'Hauterivien, entre -140 et -133 Ma.

¹⁰ Pour reprendre l'expression romaine que l'on trouve par exemple chez Pline, H. N., III, I, 4 ou III, IV, 31.

En ligne (*interni maris* ou *interno mari* selon la déclinaison) :

https://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Pliny_the_Elder/3*.html

Luberon qui venait d'achever de se former. C'est donc là l'origine des "combes" de Buoux et de Lourmarin ainsi que des gorges du Régalon (comme des gorges du Verdon) que les crises climatiques accompagnant les grandes glaciations quaternaires ont fini de creuser. Le canyon de la Durance, pour sa part, entre Oraison et Arles, a été complètement enfoui et recouvert par les sédiments que celle-ci a arrachés aux Alpes. Car vers 5,3 Ma, le détroit de Gibraltar s'est rouvert et l'océan a envahi la mer intérieure, modifiant une nouvelle fois le profil d'équilibre des cours d'eau et provoquant cette fois un alluvionnement intense¹. A Oraison, le canyon de la Durance se trouverait ainsi à 300 m sous le niveau de son lit actuel, et à Arles à 1000 m environ²... On peut cependant imaginer que pour creuser de tels canyons le débit des rivières était très puissant, nourri par des précipitations extrêmement abondantes. Elles étaient probablement aussi parfois très violentes, dès lors que les Alpes avait créé en se soulevant le cadre géographique qui détermine une grande partie des phénomènes orageux du bassin méditerranéen nord-occidental. Il n'y a donc rien d'in vraisemblable à envisager que sur le flanc méridional du Luberon les ruissellements aient pu entraîner les sédiments qui forment les brèches dites de Cucuron.

A la base de ces brèches se trouve toutefois un épisode limoneux très intéressant, marqué notamment à la ferme de l'Aumane à 2,6 km à l'est/nord-est de Cucuron. Il est associé à une faune que l'on a coutume d'appeler, depuis sa publication au siècle dernier³, faune du Mont Luberon (ou Léberon)⁴. Il faudrait donc la situer chronologiquement vers -5,8 Ma. C'est un ensemble très riche. A. Gaudry, premier paléontologue français à avoir défendu la théorie de l'évolution de C. Darwin, y a reconnu en 1873 une dizaine d'herbivores. Parmi eux se distingue *Dinotherium* ou *Deinotherium giganteum* qu'A. Gaudry a qualifié en 1873 de « *plus gigantesque de tous les animaux terrestres* » de cette époque⁵. *Deinotherium* est un genre éteint d'éléphants qui portait des défenses à la mâchoire inférieure, pointées vers le bas. Il pouvait mesurer 3,50 à 4 mètres, voire 4,50 mètres de haut à l'encolure pour un poids moyen estimé entre 5 et 10 tonnes. Il côtoyait *Rhinoceros schleiermachi*, un rhinocéros qui présentait quelques affinités morphologiques avec ceux d'Afrique. Quoique de grande taille, il semble

¹ On estime couramment que durant ces 5 derniers millions d'années, plus de la moitié du relief alpin a été enlevé par l'érosion et drainé par les cours d'eau.

² Sur le sujet, on peut consulter C. Balme, G. Clauzon, M. Denis, M. Dubar, P. Gigot, J.-L. Guendon, S. Legal, M. Liouville, J.-P. Masse, L. Moutier, J. Nicod, D. Nury, M. Philippe, E. Salesse, J.-M. Triat, Découverte géologique du Luberon, Paris/Apt, BRGM/Parc naturel régional du Luberon, 1998, pp. 133-134. Ces profondeurs sont celles que la Durance aurait atteintes à la fin du Messinien. Cela peut paraître énorme, mais 1000 m en 0,5 Ma cela représente en moyenne... 2 mm par an.

³ A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés (pp. 5-112) ; P. Fischer, R. Tournouër, Etude sur les invertébrés (pp. 113-227), Paris, Savy éditeur, 1873.

En ligne : <https://www.biodiversitylibrary.org/item/106996#page/7/mode/1up>

C. Depéret, Recherches sur la succession des faunes de Vertébrés miocènes de la vallée du Rhône, ds Archives du Muséum d'histoire naturelle de Lyon, 4, 1887. pp. 45-313.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/mhnly_0374-5465_1887_num_4_1_945

⁴ Voir par exemple la carte géologique à 1/50 000, Reillanne, XXXII-42, Orléans, (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) B.R.G.M., 1966 (1974), Notice explicative, p. 4.

En ligne : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0968N.pdf>

⁵ A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 76.

Sur des sites de même horizon, on a également identifié *Mastodon* (ou *Tetralophodon*) *longirostris* : voir C. Depéret, Recherches sur la succession des faunes de Vertébrés miocènes de la vallée du Rhône, notamment p. 111.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/mhnly_0374-5465_1887_num_4_1_945

Il s'agit d'un autre ancêtre des éléphants un peu plus petit (2.60 à 3.50 m à l'épaule) avec quatre défenses (deux supérieures longues, deux inférieures plus courtes) qui constitue peut-être une évolution vers les éléphants modernes.

toutefois avoir été un peu moins massif que les rhinocéros africains modernes¹. Dans un gisement situé un peu plus bas, A. Gaudry a également reconnu un autre rhinocéros, *Acerotherium incisivum*. Il s'agit d'une forme plus primitive de ces animaux puisqu'elle est apparue pendant l'Oligocène. Il était également plus petit que *Rhinoceros schleiermachi*. Autour d'eux évoluait *Helladotherium duvernoyi* qualifié cette fois par A. Gaudry « *de plus majestueux des ruminants qui ont habité l'Europe* »². C'était un giraffidé assez proche des okapis par ses proportions corporelles, long de 4 m, haut de 2,30 m à l'encolure et d'un poids estimé de 300 à 400 kg. *Tragocerus amaltheus* était beaucoup plus petit : sa taille ne dépassait pas celle d'un renne. A mi-chemin entre une (grande) chèvre et une antilope, avec un peu du cerf aussi³, il vivait probablement en groupes. C'était également le cas d'*Hipparion gracile*, un ancêtre du cheval de la taille d'un poney mais d'une structure plus légère comme son nom l'indique. L'abondance des restes retrouvés suggère ici de grands troupeaux. C'était sans doute également le cas de *Gazella deperdita*, une petite gazelle trouvée en abondance à Cucuron, dont les deux sexes possédaient équitablement de belles cornes en lyre. L'ensemble paraîtrait encore très exotique si certains animaux retrouvés ne nous étaient pas un peu plus familiers. C'est le cas de *Sus major*, un sanglier, quoiqu'il fût ici dépourvu de défenses et d'une taille gigantesque. Elle lui venait peut-être de l'extension des zones humides, lacs ou marais, selon A. Gaudry⁴. Cela va bien avec le climat entrevu plus haut, juste avant la crise messinienne. *Cervus matheronis* amène également une touche de pré-modernité. C'était cependant un cerf un peu plus petit que le cerf élaphe : la taille moyenne de ses bois a été estimée à un demi-mètre, alors que chez les cerfs modernes elle est de 0,70 m à 0,90 m. Pour les amateurs, il faut encore signaler deux espèces de tortues terrestres non identifiées : la carapace de la première, qualifiée de gigantesque par A. Gaudry, mesurait 1 m ou 1,10 m de large pour 1,50 m ou 1,60 m de long⁵. C'était certes bien moins que *Colossochelys atlas*, la plus grosse tortue terrestre connue⁶, mais ce n'était déjà pas si mal. Sa carapace devait mesurer 1,5 cm d'épaisseur (et non 15 cm comme indiqué par erreur dans le texte de 1873) mais son plastron atteignait 10 cm d'épaisseur⁷. La seconde était de dimensions plus limitées, mais elle atteignait quand même 30 cm de long et 20 cm de large. C'est un peu plus que nos modernes tortues grecques ou d'Hermann (ou le mélange des deux car les croisements ont été fréquents entre ces deux espèces depuis l'introduction de la première à la fin du XIXe siècle). Enfin il faut en venir aux carnivores. Ceux-ci étaient bien sûr beaucoup moins représentés, car les observations de R.T. Bakker inspirées de la savane africaine s'appliquent ici aussi : les carnivores ne représentent généralement que 1 à 5 % du total des animaux, selon les conditions naturelles plus ou moins

¹ A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 24 et p. 29 : « *L'humérus de ma collection [...] est plus grêle que ceux des rhinocéros africains [...] et même du Rhinoceros Schleiermachi.* »

² A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 76.

³ A. Gaudry n'a pas exclu qu'il eût un larmier (glande odorante située à l'angle interne de l'œil) dont le mouton conserve un souvenir mais qui est absent chez la chèvre : A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 53.

⁴ A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 42.

Cela rejoint encore la présence, sur d'autres sites de même horizon, d'un membre de la famille des castors : voir C. Depéret, Recherches sur la succession des faunes de Vertébrés miocènes de la vallée du Rhône, ds Archives du Muséum d'histoire naturelle de Lyon, 4, 1887. pp. 45-313, ici notamment p. 111.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/mhnly_0374-5465_1887_num_4_1_945

⁵ On l'a depuis baptisée *Testudo leberonensis* : F. Roman, Les collections de Géologie et de Paléontologie de la Faculté des Sciences de Lyon, ds Annales de la Société linnéenne de Lyon et des Société botanique de Lyon, Société d'anthropologie et de biologie de Lyon réunies, 78, 1934 (1935). pp. 197-264, ici p. 244.

En ligne : https://www.persee.fr/doc/linly_1160-6401_1935_num_78_1_14764

⁶ Avec ses 2,50m de long, 1,70 m de large et son poids estimé à près de 900 kg, *Colossochelys atlas* n'était quand même pas inquiétée par cette compétitrice. Au demeurant *Colossochelys atlas* est plus récente, puisqu'elle est datée de -2,6 Ma.

⁷ A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 71.

favorables¹. Les espèces découvertes n'en sont pas moins intéressantes. Le plus grand prédateur identifié en 1873 était *Machaerodus* (ou *Machairodus*) *cultridens*. Il s'agit d'un félin à dents de sabre, d'une taille comprise entre le lion actuel et le lion des cavernes que l'on retrouvera dans les chapitres suivants. Il était également moins trapu que le lion des cavernes. C'était une sorte de super-carnivore. Chez lui, bien plus que chez les félins actuels, tout était fait pour mordre et déchirer : il avait des incisives plus pointues et plus coupantes que celles des grands félins actuels, des canines supérieures en forme de lames de poignard, des molaires plus tranchantes que celles des chats²... Plus petite que le *Machairodus* de Cucuron, mais tout aussi dangereuse car elle vivait déjà certainement en meutes, on trouve *Hyaena eximia*³. C'était à la fin du Miocène, avec celles de Pikemi en Grèce et de Baltavar en Hongrie, les premières hyènes connues en Europe. Sous la forme d'autres espèces, et en particulier *Crocota crocota spelaea*, la hyène des cavernes, on rencontrera leur famille jusqu'à la fin du Paléolithique moyen dans le Luberon. Enfin, un troisième prédateur était représenté à Cucuron par *Ichthitherium hipparionum*, un animal que ses caractéristiques morphologiques plaçaient entre la civette et la hyène⁴. Après bien des hésitations on l'a d'ailleurs rangé dans la famille de cette dernière. C'est son association fréquente avec *Hipparion gracile* qui lui a valu son nom. Mais il n'a pas dû chasser ces petits chevaux. Assez court sur pattes il était d'une taille très moyenne (1,20 m de long, 0,60 m de haut à l'épaule) - et malgré sa puissance, sa mâchoire semble plutôt l'avoir prédisposé à poursuivre de petites proies. Peut-être les tortues, petites et moyennes, faisaient-elles souvent les frais de ses repas.

En plus des mouvements tectoniques qui ont affecté la fin de l'Oligocène, c'est à la phase très active du plissement alpin (qui coïncide avec la dernière séquence du Miocène, jadis appelée Pontien, aujourd'hui Messinien) que se rattachent la plupart des intrusions de lave que l'on rencontre dans le Luberon et la montagne de Lure. Elles font pendant à l'épanchement de Beaulieu, entre Rognes et le Puy-Sainte-Réparate, qui a jadis donné lieu à une exploitation. A l'occasion de séismes d'une rare violence, de véritables crevasses ont dû se former, même si elles n'ont fait parfois qu'écarter les lèvres des fractures éocènes et oligocènes. Le magma les a envahies sous des formes diverses : relativement liquide à Beaulieu, compact et visqueux à Peypin-d'Aigues... Les blocs de lave basaltique où s'anime parfois la lueur glauque des olivines offrent donc un beau témoignage des forces gigantesques qui se sont exercées jusqu'à la périphérie de la chaîne alpine lors de la naissance de celle-ci.

Au terme du Miocène, vers -5,3 millions d'années, le Luberon avait enfin trouvé son profil général et la mer s'était une nouvelle fois retirée. Pendant le Pliocène (-5,3 millions à -2,6 million d'années) elle allait revenir lécher ses pentes méridionales⁵ avant de reculer encore, définitivement vaincue cette fois⁶ par la dernière séquence du soulèvement des Alpes.

Seule l'érosion, amplifiée par la succession de climats chauds et froids, allait alors modifier l'aspect du massif jusqu'à nos jours.

¹ R. T. Bakker, Le ptérodactyle rose, Paris, A. Colin/Chabaud, 1990, pp. 378-379.

² A. Gaudry, Animaux fossiles du Mont Léberon (Vaucluse), Etude sur les vertébrés, p. 12.

³ On l'appelle aussi parfois *Adcrocuta eximia*.

⁴ Il appartient d'ailleurs à la famille de cette dernière, tout en étant plus petit : 1,20 m de long, 0,60 m de haut à l'épaule.

⁵ Près de la ferme des Argiles, à l'ouest de Mérindol, on trouve des marnes bleutées renfermant des mollusques marins (notamment des turrnelles et des corbules) datés du Plaisancien (-3,6 à -2,6 Ma).

Carte géologique à 1/50 000, Cavaillon, XXXI-42, Orléans, (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) B.R.G.M., 1966 (1974), Notice explicative, p. 4.

En ligne : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0967N.pdf>

⁶ Tout au moins pour 3 Ma (environ) car l'histoire de la Terre ne s'arrêtera pas à nos jours... et finalement, qu'est-ce que 3 Ma au regard des temps gigantesques, de l'ordre de 1500 fois plus grands, que nous avons embrassés dans ces pages ?

1.4. LE QUATERNAIRE ET SA CLIMATOLOGIE.

Presqu'à la fin du Tertiaire, il y a 3 millions d'années environ, la dérive des continents a réuni l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud, interrompant la circulation océanique entre ce qui allait devenir les océans Atlantique et Pacifique. Renvoyées vers le nord après avoir obliqué dans le golfe du Mexique, les eaux chaudes du Gulf-Stream ont provoqué d'importantes chutes de neige dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord, jusque-là très sèches. L'accumulation de ces neiges, leur transformation en glaces puis en glaciers de plus en plus épais ont entraîné la Terre dans un nouvel âge glaciaire.

Le Quaternaire a ainsi connu depuis ses débuts vers -2,6 Ma une succession de périodes glaciaires ou glaciations. Il y a quelques décennies, on en comptait six, baptisées respectivement Biber, Donau, Günz, Mindel, Riss et Würm d'après les noms du Danube et de certains de ses affluents. Aujourd'hui on en a reconnu une dizaine en Europe et plus d'une quinzaine dans le monde. Ce qui était apparu comme de longues glaciations s'est en fait révélé être une succession de périodes glaciaires plus brèves. Seule la dernière des périodes glaciaires reconnues initialement, celle du Würm, a peu varié dans la définition de ses limites.

Pendant chacune de ces périodes glaciaires, les températures se sont considérablement abaissées, les glaciers se sont largement étendus et, l'eau étant prise dans ces glaces, le niveau des mers a fortement baissé - de 200 mètres environ, par exemple, pour la séquence la plus froide de la glaciation du Riss...

C'est ce phénomène qui a permis aux hommes de la seconde moitié de la glaciation suivante, la glaciation würmienne, d'atteindre l'entrée de la grotte Cosquer, aujourd'hui à 36 mètres de profondeur dans les calanques de Cassis, et d'aller peindre le fantastique bestiaire que l'on y a retrouvé vingt à trente mille ans plus tard...

Dans le contexte général établi par la formation du continent américain, les périodes glaciaires et les réchauffements qui les séparent s'expliquent en partie par la combinaison de divers facteurs astronomiques :

- l'activité solaire d'abord, qui a considérablement varié au fil des millénaires.
- la trajectoire de la Terre autour du Soleil elle-même, ensuite, qui s'est révélée inconstante : elle a évolué d'un cercle presque parfait à une ellipse, ce qui a pu légèrement affecter la distance Terre-Soleil.
- le Soleil par ailleurs n'occupe pas le centre exact de ces orbites terrestres : on distingue donc un périhélie (point de l'orbite le plus rapproché du Soleil) ainsi qu'un aphélie (point de l'orbite le plus éloigné du Soleil).
- l'inclinaison de la Terre par rapport au plan de l'écliptique (ou plan dans lequel se situe la trajectoire de la planète autour du Soleil) s'est elle aussi modifiée : si actuellement elle est de 23°27' on estime qu'elle a oscillé ces derniers 250.000 ans entre un peu plus de 22° et un peu plus de 24°. Or l'inclinaison de la Terre sur l'axe de l'écliptique se trouve à l'origine des saisons : une obliquité plus ou moins importante accroît donc, ou réduit, l'amplitude des variations de températures qui accompagnent celles-ci.
- enfin la Terre ne se contente pas de ce léger balancement longitudinal : elle est soumise de plus à un léger balancement latéral. Combiné au précédent celui-ci produit une rotation "en toupie". Elle contribue à avancer très faiblement chaque année sur l'orbite terrestre les points auxquels se produisent solstices et équinoxes. C'est ce que l'on appelle la précession des équinoxes. Minime, ce déplacement finit pourtant par avoir des conséquences sensibles sur de longues périodes : il y a 13.000 ans, le solstice d'été dans l'hémisphère nord intervenait de la sorte au périhélie, alors qu'il se situe aujourd'hui à l'aphélie.

On a là une série de facteurs externes. A ceux-ci, il faut rajouter les grands mouvements tectoniques capables de changer - littéralement - la face de la Terre, par exemple la jonction des deux Amériques. Mais aussi le volcanisme, qui a pu provoquer à certaines époques de très longs



Pl. 04 : EXTENSION DES GLACIERS ET RETRAIT DE LA MER PENDANT LE RISS.

Il s'agit ici des maxima atteints pendant la glaciation de Riss (ou glaciation rissienne). Le volume d'eau retenu dans les grands glaciers continentaux et dans les calottes polaires était tel que le niveau de la mer se plaçait alors 200 mètres environ en dessous de l'actuel.

La carte rend compte du tracé rissien de la Durance. Cependant celui-ci demeure très hypothétique pour la traversée de la Crau et de l'étang de Berre (où l'épaisseur des sédiments rend difficile toute estimation précise) de même que pour sa partie "maritime"...



hivers qualifiés de "volcaniques". Il s'agit là de baisses des températures moyennes annuelles pouvant atteindre ou dépasser 1° C - ce qui est considérable - pendant plusieurs années consécutives. Certaines, survenues pendant les temps historiques, sont bien documentées. En fonction du contexte astronomique au moment de ces éruptions, leurs effets ont pu se trouver amplifiés ou minorés.

Enfin il faut prendre en compte les éléments terrestres du climat, essentiellement les grands courants atmosphériques et marins qui proviennent, en majeure partie, de différences de densité et de température entre les pôles et l'équateur, entre l'atmosphère et les océans, ou encore entre les eaux profondes et les eaux de surface à l'intérieur de ces derniers. Ces facteurs-là sont - très fortement - sujets à interactions. Ils sont donc susceptibles par une série de réactions en chaîne d'atténuer l'impact de certains événements affectant individuellement l'un d'entre eux, tout aussi bien que de l'amplifier suivant le cas - et selon des mécanismes encore mal connus, malgré le caractère péremptoire de certaines prévisions...

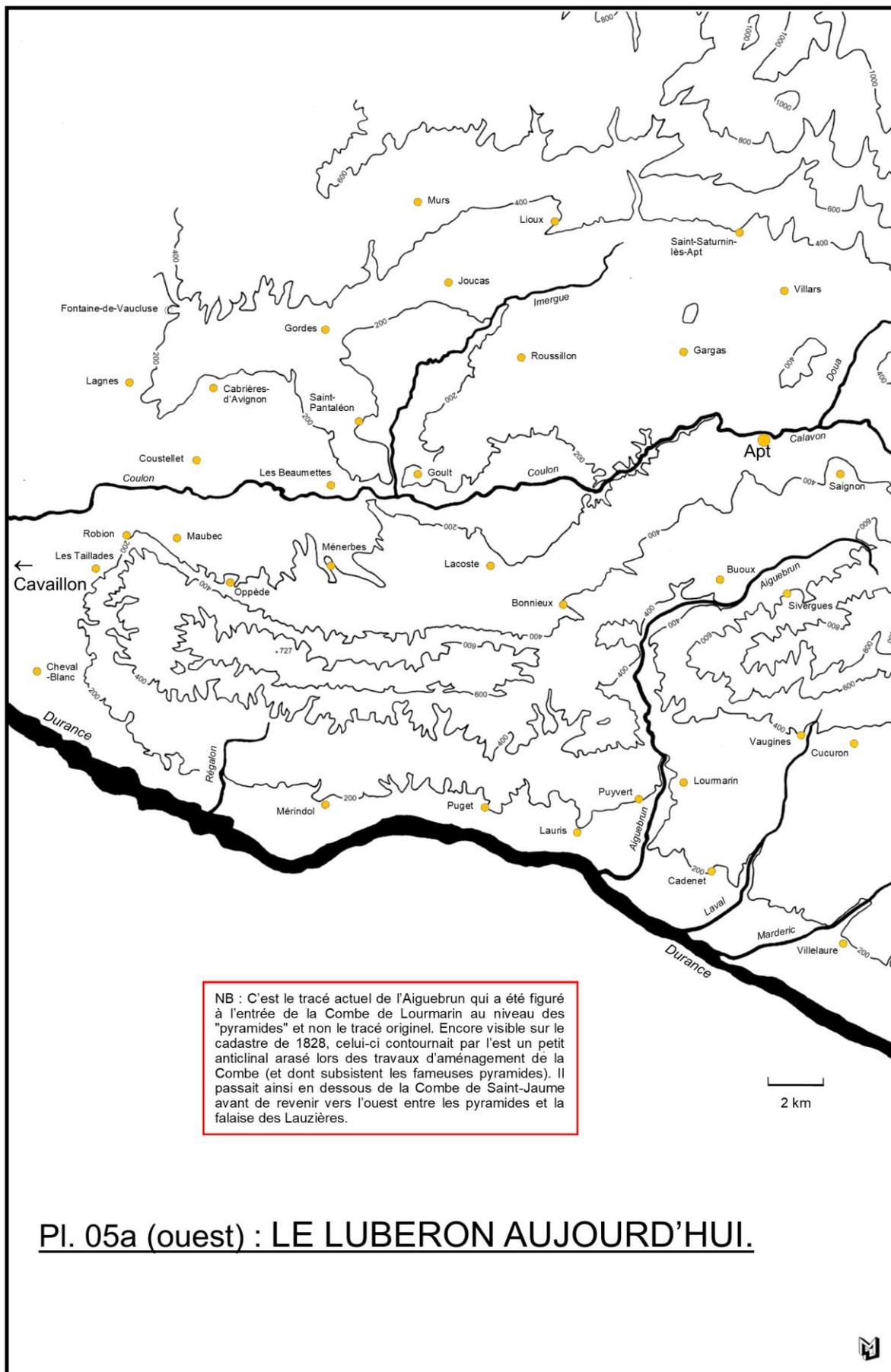
Le jeu et la combinaison de tous ces facteurs astronomiques et terrestres laissent place, entre les périodes glaciaires, à des périodes tempérées que l'on appelle interglaciations, ou Interglaciaires (du Riss-Würm par exemple).

Par ailleurs, les périodes glaciaires elles-mêmes ne sont pas des ensembles entièrement très froids. Il existe certes à l'intérieur de chacune d'entre elles des périodes (ou sous-périodes) froides. Pour la dernière glaciation par exemple on les nomme Würmiens, et on ajoute un numéro pour définir leur place, ou un adjectif (ancien ou récent)¹. Mais on trouve aussi entre ces sous-périodes froides des séquences parfois très tempérées, voire chaudes - que l'on nomme pour la dernière glaciation Interwürmiens, suivis des numéros des deux Würmiens qu'ils séparent - comme par exemple Interwürmien II-III...

Enfin à l'intérieur même des sous-périodes glaciaires (des Würmiens, pour la dernière glaciation) il existe des séquences fraîches ou tempérées que l'on nomme interstades. Nous rencontrerons ainsi à l'intérieur du Würmien II un interstade des Peyrards nommé d'après une célèbre grotte préhistorique du vallon de l'Aiguebrun, à Buoux.

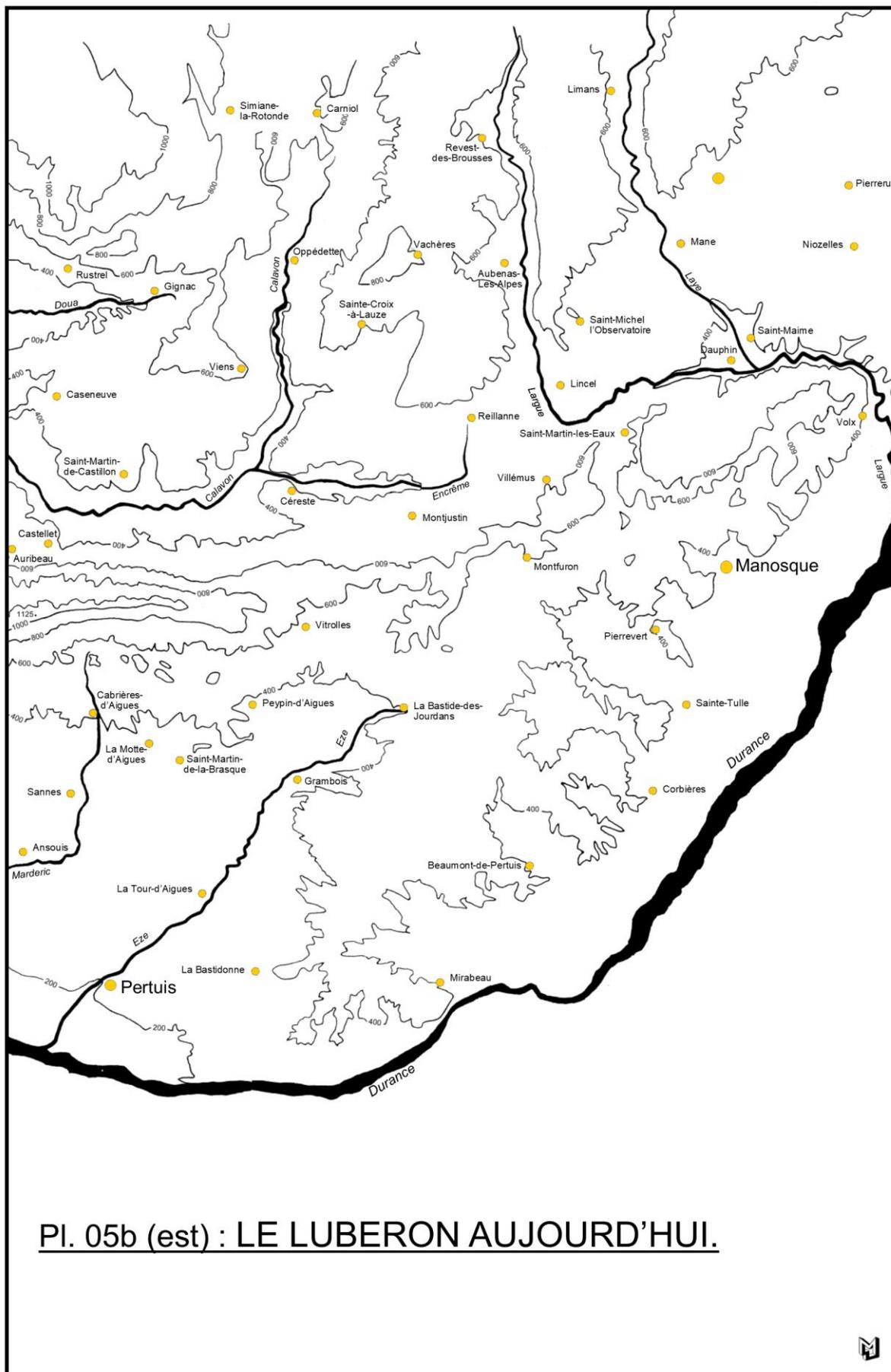
Il faut cependant garder à l'esprit que la dernière glaciation, qui a été aussi la plus brève, celle du Würm, s'est quand même étalée sur près de 100.000 ans, et que certaines des sous-périodes glaciaires que nous venons d'entrevoir ont duré plus de 25.000 ans (le Würmien I) voire 30.000 ans (le Würmien II). Même si c'est très peu à l'échelle de la Terre, on imagine alors plus aisément qu'au cours d'un même ensemble glaciaire des écarts importants ont pu intervenir dans les composantes du climat !

¹ A la fin de la dernière glaciation, notre connaissance des variations climatiques a rendu un peu vain le découpage effectué précédemment. Le vieux Würmien IV a donc cédé la place à un Tardiglaciaire plus confortable, en tout cas rendant mieux compte de la réalité telle que l'on se la représente maintenant.



Pl. 05a (ouest) : LE LUBERON AUJOURD'HUI.





Pl. 05b (est) : LE LUBERON AUJOURD'HUI.



Table des matières du chapitre 1

CHAP. 1 : LES ORIGINES.	1
1.1. AVANT LA VIE : UNE HISTOIRE PRÉBIOTIQUE ?	1
1.2. LES DÉBUTS DE LA VIE : DE LA MER À LA TERRE.....	2
1.2.1. Les végétaux.....	9
1.2.1.1. Les mécanismes de symbiose.....	9
1.2.1.2. La difficile sortie des eaux.	10
1.2.1.3. L'acquisition des racines : le rôle des mycètes.....	11
1.2.1.4. L'acquisition de la lignine, les plantes vasculaires, les fleurs.	15
1.2.2. Les animaux.	16
1.2.2.1. Des débuts difficiles... à discerner.....	16
1.2.2.2. De la mer à la terre, d'abord les invertébrés.	18
1.2.2.3. Les premiers vertébrés à respiration aérienne.	21
1.2.3. D'autres règnes et leurs interactions étroites : de nécessaires redéfinitions.	22
1.2.3.1. Les mycètes.	22
1.2.3.2. L'humain, un bon exemple de symbioses multiples et de... fin de règne ?	30
1.2.3.3. Retour vers la forêt et ses mycètes.	36
1.2.3.4. Les lichens : en marge des mycètes, et à cheval sur les règnes.....	45
1.2.3.5. Et pour finir, une amibe que l'on avait prise pour un mycète !	47
1.3. LA FORMATION DU LUBERON : UNE LONGUE HISTOIRE.	49
1.3.1. Un Luberon de vase et de sables.	49
1.3.1.1. Avant le Luberon.....	49
1.3.1.2. Le matériau d'une montagne.	52
1.3.1.3. Quelques os... et des sables verdâtres.....	55
1.3.2. Une île, ou des îles, et des ocre.....	56
1.3.2.1. Dinosaures : des espèces assez nombreuses.....	57
1.3.2.2. Et des œufs, par milliers.	66
1.3.3. Des lacs, des collines, et une forte activité sismique.	69
3.3.1. L'Eocène.	70
3.3.2. L'Oligocène, des grès verts aux lamines calcaires.	71
1.3.4. Le retour de la mer... et son retrait, deux fois encore.	76
1.4. LE QUATERNAIRE ET SA CLIMATOLOGIE.	82