

Echos des journées nationales 2024 de l'APBG

ÉCHOS DES JN



TERRE & UNIVERS

Cette année, nos journées nationales de formation ont été organisées en partenariat avec l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU). En ouverture des journées, Nicolas ARNAUD, son Directeur, nous fit une présentation de son Institut.

L'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) a pour mission de concevoir, d'animer et de coordonner des recherches nationales et internationales dans les domaines de l'astronomie, des sciences de la Terre, des surfaces continentales, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace. Il structure la recherche nationale dans son domaine, notamment en pilotant le réseau des Observatoires des sciences de l'Univers (OSU).

Les missions nationales de l'INSU, reconnues par l'arrêté du 29 avril 2016, embrassent une diversité de thèmes cruciaux pour la compréhension de notre Univers et de notre planète. Parmi ses axes stratégiques, on compte l'étude de la formation et de l'évolution de l'Univers, la recherche sur la structure de la Terre, l'exploration des ressources naturelles et la prévention des risques telluriques, ainsi que la surveillance de l'atmosphère, du climat et des interactions environnementales. En liaison avec les organismes et les universités partenaires, l'INSU conduit des exercices de prospective scientifique afin d'identifier des axes de recherche émergents à soutenir prioritairement, finance des projets de recherche dans le cadre de programmes inter-organismes qu'il coordonne, et met en œuvre des équipements nationaux et internationaux.

Pour atteindre ces objectifs ambitieux, l'INSU dispose d'infrastructures d'observation de pointe, soutient des services à long terme et participe activement à des projets de recherche internationaux, renforçant ainsi l'impact de la recherche française à l'échelle mondiale. En contribuant activement aux organisations internationales majeures tels que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ou la prospective européenne en astronomie, il concourt de façon majeure à l'exploration des mystères de l'Univers et à éclairer les grands enjeux tels que le changement climatique et ses impacts ainsi que les nécessaires transitions de nos sociétés.

L'édition 2024 était placée sur le chemin de la connaissance en Géosciences. Avec plus de 400 professeurs de SVT réunis les 22, 23 et 24 novembre 2024 à l'Université de Paris Cité, les Journées nationales de l'APBG ont connu un franc succès. C'est la preuve que nos Journées nationales sont un point fort et incontournable pour notre association et contribuent à la formation continue des enseignants de SVT. Elles offrent chaque année un temps de formation nécessaire et complet à nos adhérents. Ce succès démontre d'une part, l'importance de la formation dans une discipline en plein développement et, d'autre part, la volonté du corps enseignant d'avoir un enseignement en prise directe avec la recherche et la science appliquée. Les APBGistes se sont fortement mobilisés à l'occasion de l'année des Géosciences et nous les en remercions. Nos remerciements s'adressent également aux conférencières et conférenciers qui nous ont livré un aperçu des avancées scientifiques et des découvertes porteuses d'avenir et de progrès, sans oublier les exposants venus très nombreux cette année. La Société Géologique de France qui avait convié en soirée les enseignants, pour découvrir sa très belle bibliothèque et ses publications, doit aussi être vivement remerciée. Ce fut un moment convivial de partage autour d'un buffet pour les 73 inscrits à la visite. Nous espérons que vous vous tiendrez à nouveau à nos côtés pour l'édition 2025 dans l'engagement associatif qui est le nôtre avec nos Journées de formation. Nous n'en doutons pas !

Gilbert Faury
Coordinateur des Journées nationales



Présentation de la Conférence inaugurale à 2 voix de Pierrick GRAVIOU et Erik ORSENNA



Visite de la bibliothèque de la Société Géologique de France (SGF)

Conférence 1- La Terre et le mystère des origines

par **Pierrick GRAVIOU** et **Erik ORSENNA**

Les dessous d'une improbable rencontre

Les conférenciers commencent par retracer leur rencontre qui remonte à quelques années et qui s'est traduite par l'écriture d'ouvrages scientifiques volontairement accessibles et illustrés. Un projet généreux réunissant un géologue et un écrivain. Une improbable rencontre, mais une collaboration heureuse et fructueuse... Erik Orsenna se dit « raconteur d'histoires » : « Raconter, c'est comprendre. Comprendre, c'est s'émerveiller. S'émerveiller, c'est aimer. Aimer, c'est protéger. Mais raconter, c'est aussi s'interroger ». On sait qu'il a une belle plume, il la met avec efficacité au service de la médiation de la géologie pour le plus grand nombre. Pierrick Graviou est le géologue détenteur du savoir. « Raconter une histoire » est, nous le savons, la meilleure façon de capter et maintenir attention, intérêt.

Le thème de leur conférence est l'histoire la plus longue et la plus extraordinaire de toutes les histoires, celle de la Terre. Et les questions sur ce thème sont nombreuses... Ils en ont retenu trois.



Livre « Il était une fois la Terre » - Illustration de Serge Bloch ©

La Lune, fille de la Terre ou étrangère de passage

La première de ces questions concerne l'origine de la Lune, véritable régulateur de la Terre. C'est elle qui est responsable des marées, qui stabilise la planète, qui rythme les saisons, et qui agrémentent notre ciel nocturne.

Ses caractéristiques

Elle est sensiblement plus jeune que la Terre (4,51 Ga / 4,57 Ga). Elle ne tourne pas dans le plan équatorial de notre planète. Elle montre une composition isotopique très proche de celle de la Terre et une composition chimique qui se rapproche de celle du manteau. Il s'agit d'un satellite très gros et très massif.

La théorie de la formation simultanée (1873)

La Terre et la Lune se seraient formées en même temps et à partir des mêmes matériaux. Difficultés : les deux corps célestes devraient avoir le même âge et une composition chimique identique.

La théorie de la fission (1898)

La Lune se serait détachée de la Terre en rotation, encore chaude et molle, grâce à la force centrifuge. Difficultés : il aurait fallu que la Terre ait eu une vitesse de rotation phénoménale. La Lune devrait tourner dans le plan équatorial de la Terre.

La théorie de la capture (1910)

Un corps céleste de passage serait rentré dans le champ gravitationnel de la Terre et s'y serait désintégré, avant de se

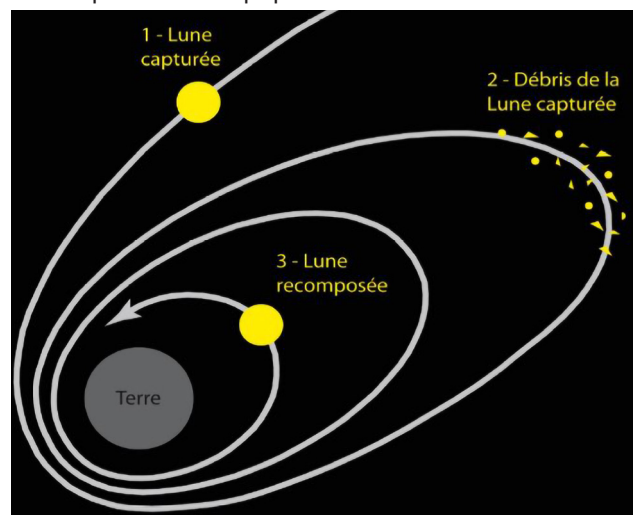


Erik Orsenna, David Boudeau et Pierrick Graviou

Professeur d'économie des matières premières, ÉRIK ORSENNA devient conseiller culturel du président François Mitterrand avant de rejoindre le Conseil d'État. Depuis quinze ans, il accompagne des entreprises impliquées dans le développement durable. En parallèle écrivain, prix Goncourt 1988, élu à l'Académie Française en 1998, il est ambassadeur de l'Institut Pasteur. Depuis mai 2024, il est aussi ambassadeur-reporter des aires éducatives ainsi que créateur de l'association internationale Initiatives pour l'avenir des Grands Fleuves.

Docteur en géologie, ancien ingénieur au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), PIERRICK GRAVIOU travaille depuis de nombreuses années sur l'inventaire national du patrimoine géologique. Il a ainsi été amené à découvrir et à étudier de nombreux sites géologiques remarquables, tant en Outremer qu'en France métropolitaine. Aujourd'hui conférencier, photographe et animateur d'excursions géologiques, il est l'auteur d'une vingtaine d'ouvrages de vulgarisation pour les enfants, comme pour les adultes.

reconstituer. Difficultés : il est peu probable que la Terre ait réussi à capturer un corps aussi gros et aussi massif que la Lune. Ce scénario n'explique pas que la Terre et la Lune aient une composition isotopique très similaire.



La théorie de l'impact géant (1946)

Une planète en errance dénommée Théia serait venue percuter la Terre. De nombreux fragments de roches en fusion auraient été projetés dans l'espace avant de s'agglomérer pour former la Lune. Difficultés : dans ce cas, la Lune devrait être constituée d'éléments provenant des deux protagonistes et ne pas avoir une composition isotopique similaire à celle de la Terre.

Où est donc passée Théia ?

Selon certains géophysiciens, des morceaux de Théia se-



raient présents à l'intérieur de la Terre, à la limite manteau / noyau. Pour d'autres chercheurs, Théia aurait été vaporisée avec la Terre au moment de l'impact pour former une synestia... Enfin, selon une autre théorie, Théia n'aurait jamais existé et c'est une vingtaine d'impacts consécutifs qui seraient à l'origine de la Lune. La vérité est peut-être ailleurs. Le mystère reste entier. Alors, continuons à chercher, mais aussi à rêver !

L'émergence des premiers continents

La deuxième question a trait à l'émergence des premiers continents, condamnés à errer à la surface de la Terre jusqu'à la fin des jours. Résultent-ils essentiellement de la sagduction, processus gravitaire qui n'a plus cours depuis le début de l'Archéen, ou sont-ils issus du fonctionnement de la tectonique des plaques dès l'Hadéen ? Rien n'est moins sûr.

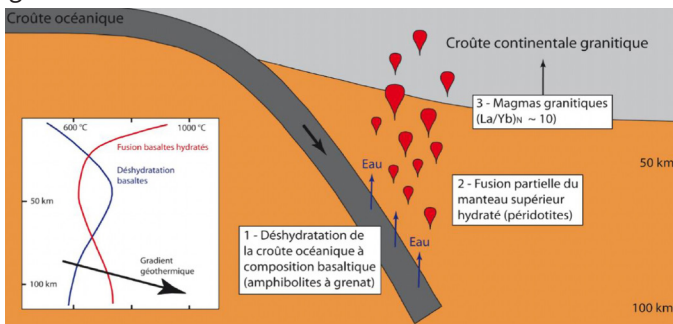
Aujourd'hui, les granoïdes qui constituent les continents se forment dans les zones de subduction selon les règles de la tectonique des plaques. Mais qu'en était-il à l'Archéen et à l'Hadéen, autrement dit il y a plus de 2,5 Ga.

Les roches les plus anciennes de la planète (4 Ga)

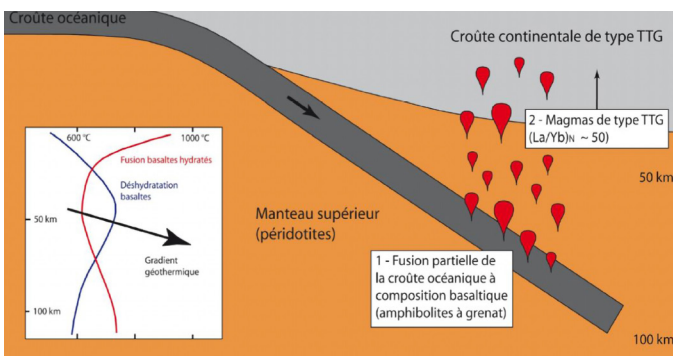
Les terrains archéens se situent essentiellement en Amérique du Nord, en Afrique du Sud et en Australie. Mais les roches les plus anciennes de la planète sont aujourd'hui représentées par les gneiss d'Acasta (Canada), datés d'environ 4 milliards d'années. Ces roches appartiennent à la famille des TTG (Tonalites, Trondhjemites, Granodiorites).

Les zircons de Jack Hills - Australie (4,4 Ga)

Ces zircons trouvés dans des roches d'origine sédimentaire auraient cristallisé dans des magmas à l'origine des TTG. Ils seraient donc les témoins de l'existence d'une croûte continentale il y a 4,4 milliards d'années. Mais quelle serait l'origine d'une telle croûte ?



La tectonique des plaques depuis le Protérozoïque (2,5 Ga - Actuel)



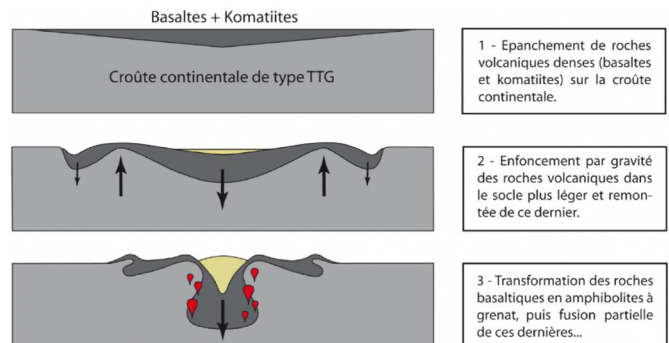
La tectonique des plaques à l'Archéen et à l'Hadéen (4,4 Ga - 2,5 Ga)

Est-ce aussi simple ?

Si l'on en croit de nombreux chercheurs (Hervé Martin), la tectonique des plaques aurait ainsi fonctionné à l'Archéen, et même dès l'Hadéen, il y a plus de 4 milliards d'années.

Le problème, c'est qu'à cette époque, la Terre est beaucoup plus chaude et les matériaux moins rigides, ce qui a amené différents géologues à rejeter la tectonique des plaques et à proposer d'autres modèles.

La sagduction : un mécanisme gravitaire antérieur à 2,5 Ga



Le mystère universel de la Vie

La troisième question entoure le mystère universel de la Vie. A quelle époque cette dernière est-elle apparue ? Dans quel environnement, terrestre ou extraterrestre, a-t-elle vu le jour ? Et comment s'est effectué le passage de l'inerte au vivant ? Une dernière interrogation qui remet en scène le problème de la génération spontanée.

Si l'on croit connaître les ingrédients nécessaires à l'apparition de la Vie, on ne sait pas grand-chose de cet heureux événement... On pense simplement qu'il aurait pu avoir lieu à partir du moment où l'eau est présente à l'état liquide à la surface de notre planète, c'est à dire il y a 4,4 milliards d'années. Mais dans quel environnement ? Peut-être... Dans le fond d'une baie, à l'abri de la houle et des marées ou sur les fonds océaniques, près des sources hydrothermales ou bien sans le cosmos, sur une autre planète, ou sur une comète.

De la Vie, on ne sait donc ni quand, ni où, ni comment elle est apparue...

L'idée qui semble s'imposer, c'est que le passage de l'inerte au vivant s'est matérialisé par une génération spontanée d'êtres animés, n'en déplaise à Louis Pasteur. Un passage qui s'est peut-être effectué à différentes reprises sur notre planète dès l'Hadéen. La Vie a en effet pu apparaître une première fois à cette époque avant d'être éradiquée puis de réapparaître, par hasard ou par nécessité...

C'était la petite histoire et les mystères de notre planète.

Conclusion

Par ce projet original, l'alliance entre un scientifique et un romancier, les deux conférenciers ont réussi le pari de nous raconter une belle histoire de la Terre, c'est-à-dire d'aborder pour le plus grand nombre un sujet complexe, mal connu mais qui intéresse tout le monde. Un récit scientifique à la découverte de l'histoire mouvementée de notre planète. Un récit qui fut très agréable à suivre, pétri d'émotions. Des explications à la fois simple et claires, un récit vivant.

Durant la conférence et dans un plaidoyer ému, Erik Orsenna a défendu notre chère discipline. « De votre mission, c'est à dire montrer que la science, c'est celle que vous enseignez, doit raconter le vivant et ne peut pas se réduire uniquement aux mathématiques. À chaque fois, j'essaie de mettre au service des scientifiques mon très improbable apport qui s'appelle raconter une histoire ».

Et pour compléter et enrichir cette belle histoire, je vous conseille de lire leur dernier ouvrage, « Il était une fois la

ÉCHOS DES JN

Terre », publié aux éditions Gallimard. Un grand récit de l'histoire de la Terre, dans une organisation originale en 50 courts chapitres de 2 à 4 pages qui en facilitent la lecture et avec les illustrations remarquables de Serge Bloch.

Par Gilbert Faury



Conférence 2- La tectonique des plaques océaniques, un mécanisme fondamental du système Terre

par Mathilde CANNAT

« Le système Terre » est une notion pertinente pour faire face aux défis posés par les changements environnementaux provoqués par les activités humaines.

L'exposé s'articule autour de trois questions :

Les océans ont-ils l'âge de la Terre ?

L'océan global représente 70,8% de la surface totale. 60% des fonds océaniques ont été formés aux dorsales médio-océaniques donc 10% sont constitués de continents immergés. Les définitions du terme océan diffèrent selon les scientifiques qui les étudient.

Pour les géologues, les océans, ce sont les fonds océaniques qui ont au maximum 180 Ma et sont sans cesse renouvelés. Pour les océanologues, les océans correspondent à la colonne d'eau. L'eau existe depuis les débuts de la Terre (~4Ga) avec sans doute une double origine (accrétion et grand bombardement météoritique) dont il reste à déterminer la proportion. Le temps de résidence moyen d'une particule d'eau dans l'océan est de 3000 ans avant d'être évaporée et de retomber en pluie (cycle de l'eau). Par ailleurs, la circulation thermohaline globale entraîne une particule d'eau d'un pôle à l'autre en 1000 ans si elle est prise dans ce tapis roulant.

Donc non, les océans n'ont pas l'âge de la Terre.

Néanmoins, on trouve la trace de plaques subductées jusqu'à la base du manteau terrestre (-2900 km). Il y a donc une communication : ces plaques formées aux dorsales, ayant interagi avec la vie et l'hydrothermalisme lors de l'expansion océanique, sont réinjectées dans le manteau lors de la subduction. La Terre est un système dynamique et, donc, la notion de système Terre doit être étendue de la zone habitable à l'épaisseur du manteau car surface et profondeur communiquent et échangent avec des constantes de temps très importantes (plusieurs centaines de millions d'années).

Voyons comment surface et profondeur communiquent par l'intermédiaire du cycle de l'eau et du cycle du carbone.

La lithosphère océanique est hydratée lors de l'expansion océanique puis déshydratée lors du plongement (désertification). Cette eau, en permettant la fusion partielle du manteau, est en partie responsable du magmatisme d'arc relâchant des gaz très riches en eau. Il y a donc une partie de l'eau qui est relâchée par la lithosphère et reprise dans le cycle de l'eau.

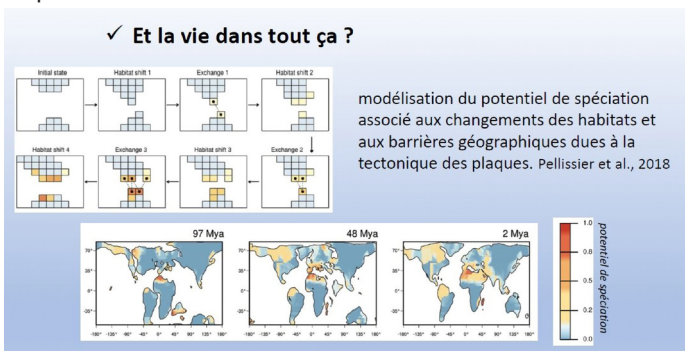


MATHILDE CANNAT est spécialiste des processus tectoniques, magmatiques et hydrothermaux associés à la formation des plaques océaniques à l'axe des dorsales. Elle collabore avec des biologistes pour étudier l'impact de ces processus sur la vie dans les grands fonds marins. Après un doctorat à l'Université de Nantes, puis un post-doctorat à l'Université de Durham (GB), elle intègre le CNRS au laboratoire de Géosciences Marines de l'Université de Brest, puis à l'Institut de Physique du Globe de Paris. Médaille d'argent du CNRS en 2009, son approche couple plusieurs méthodes de la géologie et de la géophysique et repose sur l'acquisition de données en mer, depuis la surface et avec des submersibles

Une autre partie de l'eau des roches lithosphériques rentre dans le manteau et y restera plus d'une centaine de Ma. Pour preuve, on a analysé des diamants trouvés dans les kimberlites contenant des inclusions hydratées provenant de la zone de transition du manteau (500 km de profondeur). Or l'eau intégrée dans les roches change leurs propriétés physiques, et, en diminuant la viscosité, facilite notamment la déformation des plaques qui subduisent et donc par là même les grands mouvements tectoniques les plus superficiels. Elle pourrait ainsi accélérer la tectonique des plaques.

Il y a un feedback entre les processus superficiels du cycle de l'eau et la machine terrestre dans son ensemble.

En quoi la tectonique des plaques est-elle importante pour la vie ? Elle crée les reliefs qui permettent pour une part ce cycle de l'eau continentale. Elle crée de nouveaux espaces de vie, isole ou réunit des habitats et accélère l'évolution des espèces.



Peut-on mettre en relation diversification du vivant et histoire de la tectonique des plaques ?

Au début, la Terre était trop chaude pour former des plaques. On s'accorde sur une seule plaque très peu mobile. Après une période de transition (les auteurs ne s'accordent ni sur son âge ni sur sa durée), se met en place la tectonique des plaques telle que nous la connaissons. Les chercheurs ne s'accordent pas non plus sur l'âge du début de la tectonique



des plaques et il est très hypothétique de le lier au début de la vie pluricellulaire. L'explosion de la vie au phanérozoïque (~ -570 Ma) correspond à la période où la tectonique qui a recyclé beaucoup d'eau et est très active. On retrouve néanmoins des témoins de vie pluricellulaire plus anciens vers 800 Ma, mais peu fossilisés. Il faut aussi retenir que vers -2,7 Ga, il existe des bactéries capables de photosynthèse qui oxygènent les océans et l'atmosphère. Plus les âges sont anciens et plus les témoins d'une tectonique sont rares. Un article très récent développe l'hypothèse du début de la tectonique des plaques au phanérozoïque alors que d'autres auteurs la datent de - 4 Ga.

Mme Cannat penche plutôt pour une tectonique active à partir de - 1Ga ; avant aurait existé une tectonique plus hésitante.

Les océans captent-ils autant de carbone que toutes les forêts ?

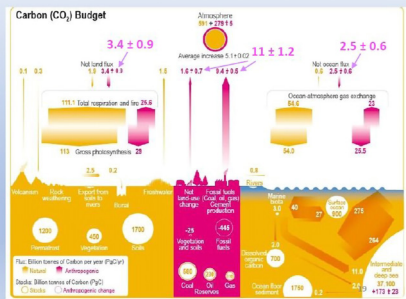
✓ les océans piègent autant voire plus de carbone que toutes les forêts du globe !

LES OcéANS CAPTURENT ACTUELLEMENT 23% DES ÉMISSIONS HUMAINES DE CO₂ (GIEC, 2021) PRESQUE AUTANT QUE TOUTE LA BIOMASSE TERRESTRE..

en jaune : estimations de référence pré-ère industrielle (1750), dits « flux naturels »

en rose : estimations dites « anthropogéniques » calculées avec la moyenne des estimations des années 2010-2019 par différence avec les flux « naturels »

unités : milliards de tonnes de carbone par an



Ils piègent 23% du CO₂ provenant des émissions humaines soit presque autant que la biomasse continentale donc plus que les forêts.

Comment ce carbone est-il piégé ?

- dans la colonne d'eau : pompe biologique et pompe physicochimique (le carbone atmosphérique dissous dans les eaux de surface est piégé pendant au moins 1000 ans dans les eaux océaniques).
- dans les roches, à des échelles de temps différentes (10 ans à >100Ma).

Les interactions entre la colonne d'eau et les roches sont encore mal connues.

Exemple 1 : interaction entre hydrothermalisme et pompe biologique du carbone.

On a découvert un écosystème fondé sur la chimiosynthèse bactérienne autour des zones hydrothermales et les fumeurs noirs

On a prouvé l'ensemencement par les fumeurs de la colonne d'eau à une profondeur de 3000 m, par du Zinc, du Fer et du

Manganèse, minéraux indispensables à la vie et entraînés jusqu'à 4000 km de distance des fumeurs.

Les fumeurs noirs jouent un rôle important dans l'existence de la biosphère océanique.

Exemple 2 : pompe physicochimique et précipitation des minéraux carbonatés dans les roches ou sur les roches.

Dans les zones de dorsales avec magmatisme peu important ou qui n'a qu'existé que rarement, les fluides hydrothermaux sont moins chauds, parfois riches en calcium et ont un pH plus élevé. Le piégeage des carbonates modifie le pH et l'acidification est contrebalancée par les fluides hydrothermaux ce qui favorise la précipitation des carbonates dans la mesure où on a suffisamment de calcium. Cette précipitation peut se produire loin des dorsales, pendant 20 Ma et constitue un flux de carbone très mal connu. Elle est dépendante du pH, de la température, de la quantité de carbonates ... **La précipitation des carbonates est donc en interaction avec la pompe à carbone physico-chimique.**

Les océans sont-ils la dernière frontière du monde sauvage ?

C'est une manière d'exprimer les choses et ce que cela sous-tend dans notre philosophie de l'environnement.

✓ 3- les océans sont-ils la dernière frontière du monde sauvage ?



Elle évoque la conquête de l'ouest américain et depuis le XVII^e siècle, beaucoup d'entreprises humaines d'exploration et de découverte du monde, avec une compréhension de la nature qui oscille entre fascination, crainte et avidité, émotions ambiguës qui ne peuvent pas mettre en position d'agir. C'est un positionnement extérieur à la nature.

Pour travailler sur le système Terre, il faut adopter un positionnement non extérieur à la nature, mais se penser comme cohabitant et usager du système visant à mieux comprendre pour mieux agir afin de préserver l'habitabilité du système.

Il est indispensable d'avoir une recherche scientifique très active au niveau de là où se posent les problèmes et que les différents secteurs des sciences s'allient aujourd'hui pour mieux le comprendre.

Par Nadine Kuntzmann

Conférence 3- Le bon usage du médicament et son impact environnemental

par Anne-Lise BIENVENU

Notre conférencière démarre sa conférence par un petit quizz qui doit aboutir à la bonne définition du médicament :

Produit présenté comme ayant des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies humaines ou animales qui doit corriger ou modifier des fonctions physiologiques.

Les médicaments peuvent être des dérivés du sang (albumine, Ig, facteurs de coagulation), tout comme les traitements anticancéreux (CAR T cells).

Elle complète cette présentation en citant deux organismes impliqués dans la diffusion des produits pharmaceutiques :

L'ANSM (Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé) : organisme d' autorisation de mise sur le marché avec notice car elle réalise le traitement et l'évaluation de défauts qualité des médicaments qui lui sont transmis par les laboratoires pharmaceutiques. Elle ne fixe pas le prix du marché.

Les compléments alimentaires ne sont pas sous la responsabilité de l'ANSM !!! Ce sont des denrées alimentaires seulement administrées par voie orale, moins encadrées que les médicaments.

L'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) surveille les précautions d'emploi, demande conseil aux professionnels de santé.

Message : le bon traitement n'est pas forcément un médicament...

La consommation de médicaments par la France n'est pas la plus importante en Europe et a tendance à diminuer.

Le top 3 est détenu par le Doliprane, le Dafalgan et le Levotyrox.

Leur bon usage passe par une posologie adaptée, pas une durée prolongée, pas pour les mêmes symptômes, pas forcément par voie intraveineuse. Les informations sûres figurent dans le résumé des caractéristiques du produit (RCP) qui permet d'évaluer la balance bénéfique /risque.

Certaines situations préconisent un médicament mais dans un autre cadre (hors AMM) car sans autre alternative thérapeutique pour une maladie à traiter impérativement.

Les français seraient les champions de l'auto-médication mais les précautions à tenir veulent ne pas augmenter les doses en pensant que cela agira plus vite et ne pas les mélanger à d'autres. Attention en particulier aux risques liés aux insuffisances rénale et hépatique.

Pourquoi agir sur le bon usage du médicament?

Il est urgent de minimiser les conséquences de leur utilisation (iatrogénie, résistance) ce qui consiste à réduire leur consommation, leur coût sans négliger l'impact environnemental de leur production, de leur consommation dans de leurs rejets. On pourra regretter que ce dernier aspect n'ait pas été plus développé (note personnelle).

Le cas de la prescription des antifongiques a fait l'objet d'un assez long développement de la part de notre conférencière.



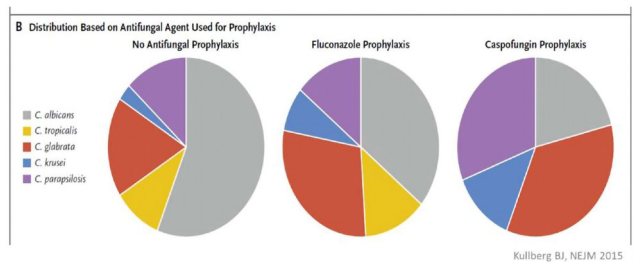
ANNE-LISE BIENVENU, née en 1979, est pharmacienne aux Hospices Civils de Lyon (HCL) depuis 2009. Après avoir obtenu son doctorat d'Université et son habilitation à diriger les recherches, elle s'est consacrée à la mycologie médicale. Depuis 2017, elle développe des actions de Bon Usage des Antifongiques

au niveau hospitalier, régional (OMEDIT Auvergne Rhône-Alpes) et national (Association Bon Usage du Médicament). Elle participe également au groupe Eco-conception des soins des HCL. Elle est l'auteur de plus de 90 publications scientifiques dans des revues internationales. Elle est membre correspondant national pour l'Académie nationale de Pharmacie (Section 6, Santé environnementale).

Dans le cadre du traitement empirique de candidose invasive où il n'y a pas d'évidence diagnostique, la mise au point de référentiels s'avère particulièrement utile. En effet, il faut traiter vite, privilégier la voie orale dans la mesure où la voie intraveineuse consomme beaucoup de plastique et n'est à priori pas plus efficace. Ne pas surexposer au traitement. En effet, les cas de résistance aux antifongiques de certaines espèces de *Candida* et leur influence sur la flore intestinale ont été décrits. Il faut donc bien identifier l'espèce de *Candida*.

CAS DES ANTIFONGIQUES - CANDIDA

DURÉE



Toujours chez les champignons microscopiques, l'espèce *Aspergillus* peut elle aussi faire l'objet de résistance par la respiration d'une spore contaminée par l'environnement qui aurait été traité de façon agricole aux pesticides.

Cet exemple permet à notre conférencière d'affirmer que le bon usage du médicament est un défi environnemental à prendre en compte sous l'angle One Health et de citer l'outil mis au point par ses services : ANTIFON-CLIC.

INNOVER

ANTIFON-CLIC® : OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

UN TRAITEMENT ANTIFONGIQUE OPTIMAL POUR TOUS

- Co-construction avec les professionnels de santé, les informaticiens et les représentants des usagers
- Soutien de la Direction Innovation
- Evaluation de la pertinence clinique et de l'usabilité
- Large diffusion possible



MESURER & AMÉLIORER LA QUALITÉ

NOTE DE CADRAGE

Référentiel de fonctionnalités d'un système d'aide à la décision en antibiothérapie



Le défi du bon usage du médicament: utiliser mieux et moins, produire moins et mieux, éliminer moins et mieux = sobriété médicamenteuse.

Par Annick Boulanger

Conférence 4- Les cellules : une histoire de la vie

par **Christian SARDET**

Les cellules, les briques élémentaires de la vie

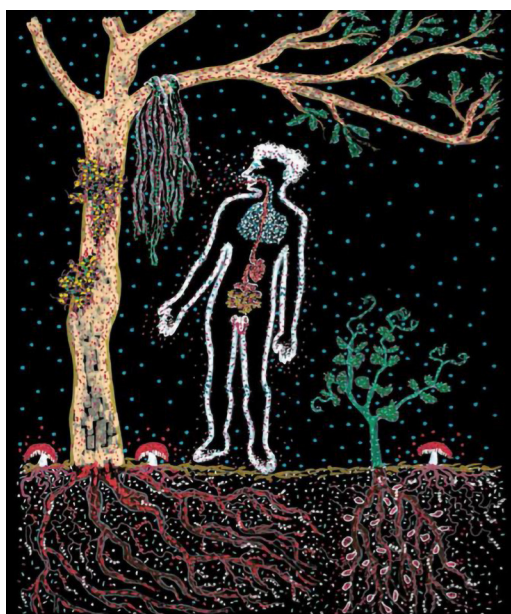
L'essentiel des processus fondamentaux de la vie et des interactions écologiques se déroulent à une échelle microscopique. Avec Christian Sardet nous partons à la rencontre de leurs actrices principales : les cellules. Tout ce qui vit sur Terre, des bactéries aux arbres et aux humains, est constitué de cellules.

Dans cette première partie, Christian Sardet présente l'histoire des observations et des descriptions des cellules.

En 1660 Robert Hooke, « le Léonardo Da Vinci anglais », invente le mot « cells / cellules » pour désigner ce qu'il voit au microscope : des cubicules dans des tranches de liège. Ces cubicules lui rappellent les « cells / cellules » qu'occupent moines ou prisonniers. Puis Anton Van Leeuwenhoek, drapier hollandais, polisseur de lentilles observe des bactéries, des spermatozoïdes et d'autres « animalcules ».

Il y a 300 ans le savant hollandais Nicolas Hartsoeker imagine qu'un homme en réduction, un « homunculus », est blotti à l'intérieur d'une cellule de sperme humain. 3 siècles plus tard, on découvre que le spermatozoïde possède des chromosomes avec l'ADN du père dans un noyau, des mitochondries, organite qui fournit l'énergie pour la nage du spermatozoïde vers l'ovocyte, des microtubules, élément du cytosquelette qui permet l'ondulation du flagelle et la nage.

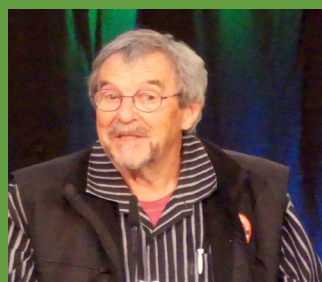
1700 à 1900 : la théorie cellulaire naît et se propage en Europe. Chaque cellule naît d'une autre cellule. Les cellules des plantes et animaux sont du même type avec noyaux et chromosomes. Elles sont les descendantes des unicellulaires (bactéries et protistes).



La vie, un réseau social de cellules - Illustration C. Sardet

Les deux grands types de cellules

Les plus simples, les procaryotes (bactéries et les archées) sont des cellules sans noyau mais avec un chromosome. Depuis les origines, les bactéries et les archées coopèrent et rivalisent. Elles échangent des gènes et des molécules, s'engouffrent et se domestiquent. Ces mélanges ont don-



CHRISTIAN SARDET est Directeur de recherche émérite CNRS au laboratoire BioDev de l'institut de la Mer de Villefranche sur Mer (CNRS et Sorbonne Université), est auteur de nombreuses publications sur les molécules, cellules, embryons et plancton et concepteur de films, dessins animés et DVDs primés. Il a reçu le Grand Prix des Sciences de la Mer de l'Académie des Sciences et le Prix Européen pour la Communication en Sciences de la Vie, décerné par l'EMBO (European Molecular Biology Organization). En qualité de co-fondateur et coordinateur de l'expédition Tara Océans consacré à l'étude globale du plancton, Christian Sardet a fondé le projet "Chroniques du Plancton" avec le CNRS et les Macronautes, et publié aux Editions Ulmer « Plancton, aux origines du vivant » qui a été traduit en anglais, japonais, allemand et chinois.

né naissance à des cellules plus complexes et volumineuses dotées d'un noyau et de chromosomes, les eucaryotes. Les eucaryotes sont d'abord apparus sous la forme de cellules uniques (les protistes), il y a plus de 1,5 milliard d'années. Les descendants des protistes sont un monde diversifié de cellules uniques ou associées sous forme de colonies. Des communautés de protistes contenant divers types de cellules ont évolué pour devenir des organismes multicellulaires, ancêtres de tous les animaux, plantes et champignons apparus pour la première fois il y a 700 à 600 millions d'années. Cinq extinctions majeures au cours des 500 derniers millions d'années ont remodelé la biodiversité et l'écologie des organismes.

Chaque cellule est issue d'une autre cellule

Du fait de la nécessité de dupliquer et de répartir les organites, chromosomes, cytosquelette de la cellule mère dans 2 cellules filles, les bactéries opèrent par scission tandis que les protistes animaux et les plantes effectuent la mitose.

Les virus

Ils sont vivants lorsqu'ils sont à l'intérieur des cellules qu'ils infectent. Les virus et girus (virus géants) sont des parasites, grands régulateurs des cellules. Ils font partie du vivant depuis les origines.



Différents virus - Illustration C. Sardet

ÉCHOS DES JN

Les bactéries et les eucaryotes

Les bactéries possèdent une membrane, un chromosome contenant l'ADN, quelques millions de protéines et des nanomachines. Exemple, la bactérie de nos intestins, *Escherichia coli* : 1 - 2 microns / 4000 gènes (1/3 en commun dans différentes souches), 3-5 millions de protéines.

Les cellules eucaryotes, plus complexes et volumineuses, possèdent des organites (mitochondries/noyau/réticulum, condensats, etc.), un squelette (cytosquelette fait de filaments, microtubules, etc.) et des nanomachines (ribosomes, protéasomes, spliceosomes : les omes)

Pour illustrer cette notion de cellule, une vidéo « Marius Explore la Cellule », réalisée par Yannick Mahé, Gilles Macagno, Christian Sardet et Noé Sardet, est projetée.

Les cellules et leur évolution

Tout ce qui vit sur Terre, des bactéries aux arbres et aux humains, est constitué de cellules ayant toutes pour origine une même cellule ancestrale commune : LUCA (Last Universal Common Ancestor).

La Terre était inhospitalière lorsque LUCA, le "dernier ancêtre universel commun", est apparu il y a environ 4 milliards d'années. Depuis, les cellules uniques, sans noyau - les procaryotes (bactéries et archées) - ont évolué, colonisant tous les environnements et les autres formes de vie. Comprendre comment cette première cellule est apparue il y a des milliards d'années, puis a évolué pour former tous les organismes anciens et actuels est une plongée au coeur même du vivant.

L'homme est le lointain descendant de LUCA, d'archées, de bactéries et de virus, qui ont évolué vers des organismes multicellulaires complexes. La complexité cellulaire n'a cessé d'augmenter aboutissant à la biodiversité des êtres vivants dotés de systèmes nerveux, de réseaux de communication et de conscience.

Quand et comment les cellules sont-elles apparues?

Pour comprendre quand et comment les cellules sont apparues, un dessin animé « O comme Origine.. », réalisé par Yannick Mahé, Christian Sardet, Gilles Macagno, Marie-Christine Maurel et Janet Iwasa, est projeté. Une molécule d'eau participe à la naissance de LUCA.

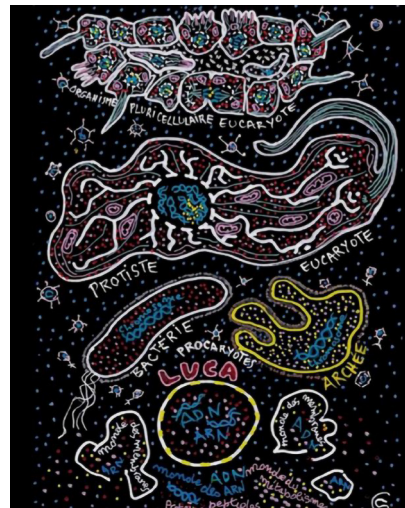
Les molécules de la vie sont constituées de 6 atomes principaux : Carbone, Hydrogène, Nitrogen (Azote), Oxygène, Phosphore et Soufre, combinées en molécules simples elles-mêmes associées en polymères : Acides nucléiques, Protéines, Lipides.

Les étapes de l'évolution des cellules et des organismes peuvent se résumer ainsi :

Origine de la vie (terrestre?) LUCA (Last Universal Common Ancestor) : -4.0 Ga – -3.7 Ga (?)

Eucaryotes - Protistes - Uni/Multi cellulaires : -2.5 Ga – -1.5 Ga

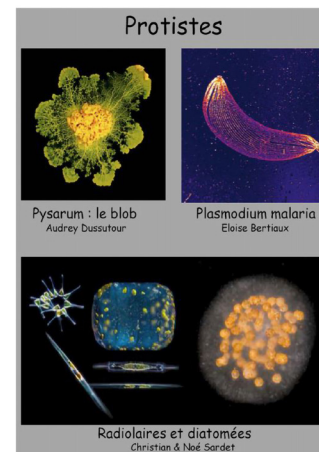
Eucaryotes - Plantes/Animaux/Champignons/Algues pluricellulaires : -2 Ga – -1 Ga



Les cellules et leur évolution - Illustration C. Sardet

Les deux grands types de micro-organismes procaryotes

- les bactéries (90% dont des cyanobactéries capables de photosynthèse) ;
- les archées (10% dont certaines sont productrices de méthane/non pathogènes).



Les cellules eucaryotes ancestrales sont des unicellulaires : les protistes (amibes, paramécies, diatomées, parasites, ...)

La biodiversité maximale est dans les océans



Le plancton : aux origines du vivant

Christian Sardet a été à l'origine de l'expédition Tara oceans (de 2009 à nos jours). Avec la Fondation Tara oceans / le CNRS / le CEA / laboratoires européens EMBL, la mission



Microbiome 2020 – 2022 avait pour but d'explorer le microbiome marin (les microorganismes et virus) et leurs relations avec l'écosystème marin.

En guise de conclusion

Dans une enquête passionnante, Christian Sardet nous a permis de comprendre l'origine et le fonctionnement des cellules et de découvrir l'unité de la vie sur Terre. De la façon la plus simple et la plus imagée possible, il nous a raconté comment fonctionnent et communiquent les cellules, et ce que nous en savons aujourd'hui. Il nous a communiqué sa passion, son coup de cœur émotionnel pour ces merveilleuses cellules et nous a fait découvrir le très large éventail

des différentes formes, ce qu'elles nous apprennent de la vie et de son évolution, comment elles ont été découvertes et sont étudiées aujourd'hui. Pour nous aider à visualiser ces mondes microscopiques difficiles à imaginer, l'auteur les a illustrés avec des dessins originaux au feutre sur fond noir. Un panorama riche de formes et de couleur illustrant l'évolution des cellules. Pari audacieux mais très réussi.

Pour approfondir davantage le sujet, je vous conseille l'ouvrage « Les Cellules – Une histoire de la vie », publié aux éditions Ulmer : une mine d'information sur ces beautés énigmatiques que sont les cellules. Un voyage fascinant dans le temps et l'infiniment petit !

Par Gilbert Faury

Conférence 5- La synthèse inclusive de l'évolution

par Etienne DANCHIN

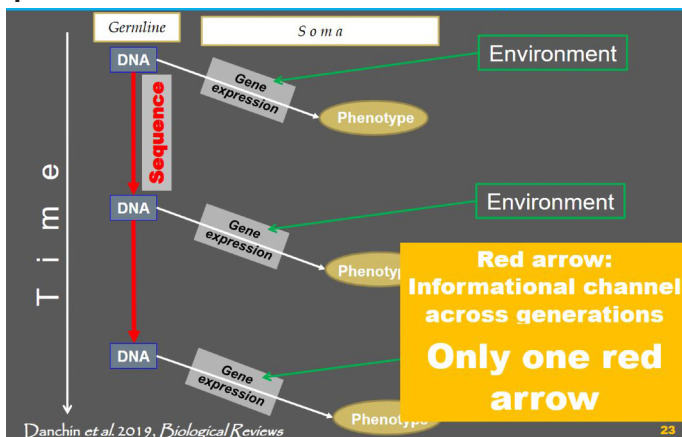
La synthèse moderne de l'évolution ou néodarwinisme est la vision dominante actuelle de la « théorie de l'évolution ». Elle est fondée sur la transmission génétique des caractères phénotypiques.

Dans, « the origin of species » Darwin montre qu'il existe au sein d'une population, une variation phénotypique des individus, transmissible de génération en génération et soumise à la sélection naturelle. Il affirme également que « toute variation non héréditaire ne nous intéresse pas » ce qui suppose qu'il y a une variation phénotypique transmise et une variation qui ne l'est pas.

165 ans plus tard, en montrant que l'information génétique est portée par la séquence de l'ADN, on a opéré un glissement sémantique ; la variation phénotypique résulte de deux sources de variation : la variation génétique transmissible et la variation non génétique soumise à la pression de l'environnement.

Ce qui doit nous intéresser, c'est la variation transmise ouverte à la sélection naturelle. On peut donc se demander qu'est-ce que l'hérédité n'impliquant pas les gènes ? Comment cette variation est-elle transmise d'une génération à l'autre ? Qu'est-ce que cela donne en terme de dynamique informationnelle à l'échelle de l'évolution ?

Quelques exemples pour répondre à ces questions : **l'effet parental.**



Vision canonique de l'hérédité par la synthèse moderne : l'effet de l'environnement passe par la régulation fine des gènes.



Ancien élève de l'ENS Ulm, agrégé de biologie, directeur de recherche émérite au CNRS, **ÉTIENNE DANCHIN** est spécialiste de l'évolution du comportement, de l'évolution culturelle et de l'hérédité non génétique. Il a commencé sa carrière au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, au centre de bagage des oiseaux, puis a rejoint le laboratoire d'écologie de l'ENS Ulm, puis a dirigé le laboratoire "Évolution & Diversité Biologique" (EDB) à Toulouse. Il a été le co-fondateur et co-directeur du LabEx TULIP regroupant 700 participants de sept laboratoires en Occitanie. TULIP en fait proposait de mettre concrètement en œuvre la Synthèse inclusive de l'évolution en Occitanie. Tous ses articles sont téléchargeables à <https://www.edanchin.fr/publications/>

Sur ce schéma une seule flèche rouge montre la transmission verticale de l'information d'une génération à l'autre. Les effets génétiques et les effets de l'environnement vont être tracés lors du développement après la fécondation.

Hérédité non génétique du comportement maternel chez le rat

On sépare ou non très tôt des souriceaux de leur mère normalement soigneuse envers ses petits. Les jeunes femelles devenues adultes se comportent comme leur mère en s'occupant ou en négligeant leurs souriceaux. Des souriceaux adoptés auront le comportement de leur mère adoptive.

Il existe des gènes de récepteurs aux hormones sexuelles normalement exprimés dans le cerveau, dont les promoteurs sont dans des états épigénétiques très différents. Les femelles normalement soignées par leur mère ont un promoteur de ces gènes non méthylé et exprimeront ces gènes à l'état adulte... Ce promoteur chez les femelles apparemment abandonnées par leur mère est fortement méthylé et les gènes ne s'exprimeront pas. Quand elles mettront bas elles ne percevront pas les changements hormonaux énormes qui se produisent et délaisseront leurs petits.

Ceci a été vu sur une dizaine de générations.

C'est une transmission non génétique impliquant le comportement et la régulation de l'expression de gènes. Ici, l'hérédité résulte de l'action conjointe de phénomènes génétiques et non génétiques.

ÉCHOS DES JN

| Hérité de réponse plastique à l'environnement

On conditionne des souris à avoir peur d'une molécule (l'acétophénone) en l'associant, dans un premier temps, à un choc électrique.

Les souris ont un système de détection des odeurs très performant avec des gènes résultant de la duplication d'un gène ancestral en de multiples copies permettant de détecter séparément un grand nombre de molécules différentes. Le gène impliqué dans la réception de l'acétophénone s'appelle *Olf151* et s'exprime dans une vingtaine de cellules du cerveau. Ce gène n'est pas surexprimé chez les souris conditionnées. La peur peut néanmoins être transmise à la génération suivante.

Dans les spermatozoïdes, le gène est hypométhylé. Le fait de conditionner les souriceaux à la peur va modifier l'état de certains gènes dans les gamètes.

Si on réalise une fécondation in vitro avec un spermatozoïde d'un de ces souriceaux devenu mature et qu'on réimplante l'embryon dans une autre femelle. Le patron épigénétique de ce gène est maintenu dans l'embryon.

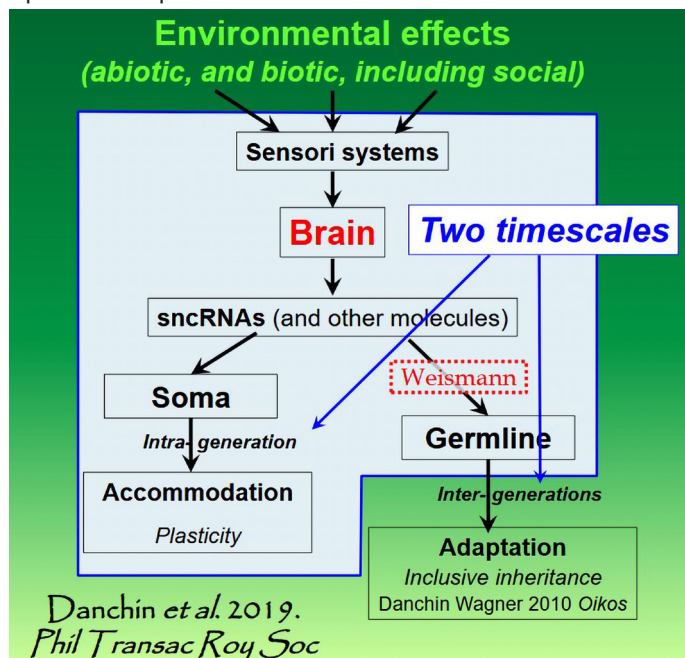
Cette variation épigénétique semble modifier le circuit de la peur. Ces souriceaux, totalement séparés de leurs parents ont peur dès la première fois qu'ils sentent l'acétophénone. On refait la même chose et on retrouve les mêmes résultats dans la génération suivante.

On a refait l'expérience avec du propanol dont les récepteurs sont codés par *Olf6*. Dans ce cas-là c'est ce gène qui est hypométhylé. Et on obtient les mêmes résultats expérimentaux.

Chez *Caenorhabditis elegans*, des silençages transgénérationnels peuvent être induits dans la lignée germinale par des ARN double brin de neurones (cellules somatiques) et cela sur 25 générations.

Une autre étude a montré cette transmission sur 80 générations.

Il y a un processus de communication entre soma et germe ce qui va à l'encontre de la notion de barrière de Weismann qui ne serait plus alors une barrière mais un filtre.



Les effets environnementaux

| Hérité du diabète acquis (diabète de type II)

Des souris uniquement nourries avec du gras. deviennent obèses et développent un diabète complet (intolérance au glucose et résistance à l'insuline). Ce trait est transmis et on a voulu montrer que cela passe par les gamètes.

On prélève des ovocytes normaux chez une femelle saine. On y injecte la tête d'un spermatozoïde d'un malade hyper nourri et diabétique. Le souriceau devient diabétique complet.

Toute l'information passe bien par le gamète.

On veut connaître le rôle des microARNs dans cette transmission. On prend un mâle et une femelle sains pour obtenir des zygotes sains. On injecte les microARNs des spermatozoïdes d'un mâle diabétique dans les œufs.

En comparant ces microARNs prélevés chez des mâles sains et diabétiques, ils constatent que la différence se fait sur 30 à 40 nucléotides. En injectant cette très courte séquence dans un œuf normal, il y a transmission de l'intolérance au glucose.

On refait la même expérience mais les mâles dont on utilise les microARNs des spermatozoïdes ont été soumis à un régime gras et sucré. Dans ce cas, les chercheurs sont capables de transférer le diabète complet en transmettant un seul microARN.

| Autre exemple : Maladie provoquée par un manque de protéine dans la nourriture et transmise aux enfants

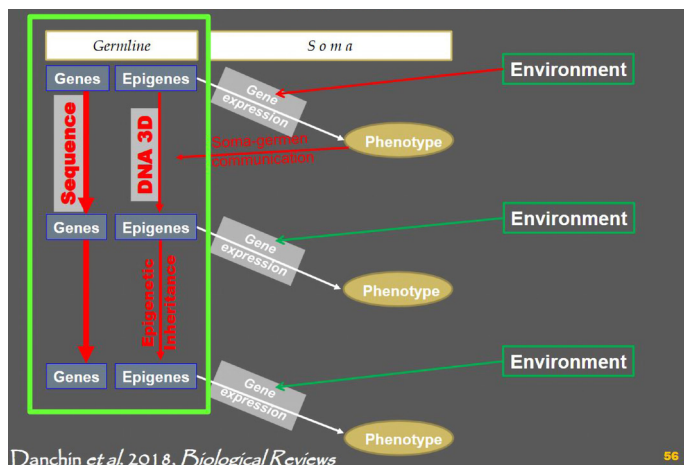
Les chercheurs reproduisent les mêmes expériences que précédemment et obtiennent les mêmes résultats. Ils recherchent l'origine de ces microARNs. Les spermatozoïdes acquièrent les microARNs dans l'épididyme. La paroi du tube de l'épididyme présente beaucoup de microvésicules remplies de microARNs. Après fusion des membranes par contact, le spermatozoïde récupère les microARNs de ces vésicules. Cela a été reproduit in vitro.

Il y a bien là une communication entre soma et germe. Cela a sans doute été sélectionné au cours de l'évolution.

| La transmission de la culture

La langue, le comportement alimentaire, par exemples, modifient les caractères phénotypiques.

La culture animale est la partie de la variation entre populations qui est transmise entre générations par apprentissage social.



L'hérité épigénétique de la lignée germinale



Exemple : populations séparées des chimpanzés utilisant des outils différents.

On veut comprendre les mécanismes en cause.

Étude chez la drosophile : on peint des mâles en rose ou en vert.

On vérifie qu'on étudie bien un apprentissage social.

Expérience : Un mâle vert copule avec une femelle ; un mâle rose ne copule pas. Deux femelles observent. On crée un dispositif expérimental permettant de récupérer les femelles observatrices de la copulation. On remplace les mâles de la démonstration. On enlève la séparation et on enregistre avec quel.s mâle.s les observatrices vont copuler.

Si la cloison est opaque, la copulation se fait au hasard 50/50.

Si la cloison est transparente : préférence nette en faveur du mâle de la couleur de celui qu'elles ont vu copuler.

Dans la nature, on n'a pas observé de préférence pour la couleur des mâles. On a appelé cela « speed learning », un apprentissage social donc.

On vérifie que le trait est transmis des plus anciens vers les plus jeunes.

Avec des démonstratrices ayant l'âge des parents de l'observatrice, on observe le même résultat.

On doit vérifier que la préférence d'un phénotype par rapport à un autre est transmise entre les générations.

La drosophile construit une mémoire à long terme sur 24 heures grâce à des protéines synthétisées de novo. Elles apprennent mieux à 24h. Elles sont capables de distinguer un mâle vert par exemple d'un autre mâle vert et de le préférer.

Sur 100000 générations, on n'observe pas de transmission significative mais si on formule l'hypothèse que les femelles sont conformistes (elles apprennent à se comporter comme la majorité) alors, au fil des générations, il y a des périodes longues de préférence du vert et d'autres de préférence du rose. Elles feraient de l'apprentissage social de façon conformiste.

Les femelles préfèrent les mâles qu'ont préférentiellement

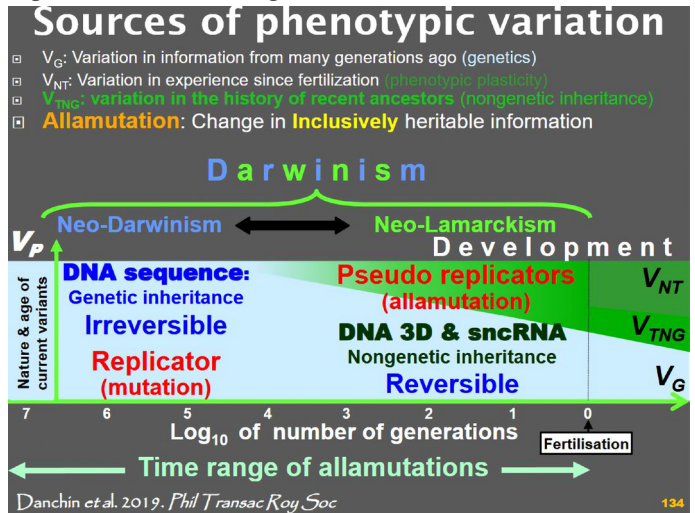
choisis leurs congénères, quelque-soit la majorité de 60 à 100 %.

Les drosophiles auraient des capacités cognitives suffisantes pour transmettre leurs préférences sexuelles. Cela pourrait durer longtemps et conduire à la spéciation.

Il faut élargir le spectre taxonomique des traditions culturelles (drosophiles insectes non sociaux).

Conclusion

Il faut cesser de penser « c'est transmis donc c'est séquençé » et élargir les sources de la variation phénotypique. Cela pourra avoir des implications importantes en médecine, en agronomie ou en biologie de la conservation.



Les sources de la variation phénotypique

Erratum : La recension de l'ouvrage « La synthèse inclusive de l'évolution » de E. Danchin parue dans le Bulletin 1-2024, par Aurélien Schwob a été attribuée à tort à Christophe Guego. Que ces deux fidèles contributeurs à la rubrique bibliographie trouvent ici l'expression de toutes nos excuses.

Par Nadine Kuntzmann

Conférence 6- L'épopée de la zone critique, un nouveau récit sur la Terre : la Terre habitable

par Jérôme Gaillardet

Le concept de zone critique, apparu dans le domaine des géosciences, correspond à la zone habitable de la Terre : nous habitons sur cette petite pellicule à la surface de la planète Terre. Cette zone critique est la zone où tout se passe.

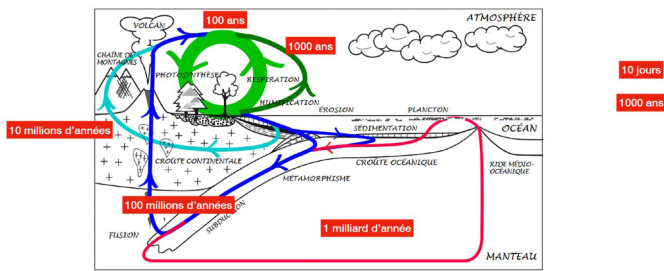
Définir ce concept de zone critique

C'est un ensemble de compartiments interconnectés ensemble mais qu'en général l'enseignement ou le discours sépare : l'atmosphère locale, l'hydrosphère, le sol cultivable, les altérites (sol des géologues), les roches, et l'ensemble des écosystèmes. Tous ces corps sont connectés entre eux, et l'initiative « zone critique » vise à étudier l'ensemble des ces compartiments comme un système : c'est une initiative holistique. Une initiative qui est destinée à reconnecter des concepts, à reconnecter des disciplines .



JÉRÔME GAILLARDET est professeur de sciences de la Terre à l'Institut de Physique du Globe de Paris et à l'Institut universitaire de France. Il co-anime l'infrastructure de recherche nationale OZ-CAR (Observatoires de la Zone Critique, applications et recherche) et est membre du Centre des Politiques de la Terre. Spécialiste de la géochimie des rivières et du traçage isotopique, il travaille à comprendre le rôle de l'altération des roches dans le cycle géologique. Il s'investit également dans la nécessaire reconnexion des sciences et la société. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2018.

Les réservoirs des géochimistes : des moments d'être en devenir...



Les cycles des géochimistes sont des devenirs éternels, des rotations infinies, ponctuées de respirations, d'arrêts, de résidences.

Ces temps de résidence, moments d'être en devenir, sont une façon de raconter la manière dont le système Terre fonctionne et donne de l'importance à cette zone critique. Cette notion de temporalité emboîtée cyclique est fondamentalement différente du temps de nos politiques, de nos sociétés, de la croissance économique.

Observatoires de la zone critique (OZCAR)

Cette zone critique étudiée du point de vue holistique, est une grande inconnue scientifique.

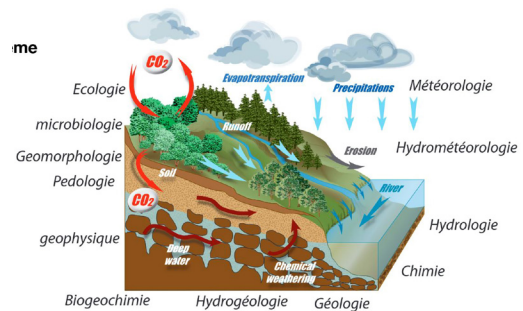
Que sera Grenoble dans 200 ans ? Ce n'est pas qu'un problème de température moyenne annuelle. On va gagner quelques degrés, mais la ressource en eau, que sera-t-elle ? Les glaciers des Alpes auront disparu ? Comment la vie dans la plaine alluviale va perdurer, sachant que les nappes ne seront plus réalimentées ?

On ne sait pas anticiper l'évolution d'une zone critique, d'où la nécessité de créer des observatoires de la zone critique.

Les observatoires des zones critiques (OZC) sont des sites instrumentés choisis pour leur représentativité. Ces observatoires sont des opérateurs de long terme, qui qualifient et quantifient des transformations pour créer des modèles numériques prédictifs. Ils sont créés pour répondre à une question sociétale.

La zone critique est aussi importante du point de vue politique. OZCAR participe au projet « Terra Forma » qui est destiné à développer des capteurs à bas coût pour minimiser l'impact environnemental et les distribuer à des citoyens, associations ou collectivités s'accaparent la question de l'évolution de leur milieu de vie.

En conclusion la zone critique est une pellicule habitable, un objet hybride pour tisser des liens entre les collectifs.



Par Armand Audinos

Conférence 7- "Repenser l'écologie comme une science de la zone critique"

par Philippe CHOLER

La zone critique : un système dynamique unique

La zone critique comme un système dynamique intégré, englobe l'ensemble des interactions complexes entre les composantes biotiques et abiotiques de la Terre. Cette zone est comme "notre maison" ou "Pachamama", elle fonctionne comme un réacteur bio-physico-chimique où se déroulent les processus essentiels à la vie.

La zone critique s'étend de la canopée des arbres jusqu'aux aquifères profonds, englobant l'atmosphère proche du sol, la végétation, les sols, les rivières et les lacs. C'est dans cette fine pellicule à la surface de la Terre que se produisent les interactions les plus intenses entre l'air, l'eau, les roches et les organismes vivants. Cette zone est à la fois notre habitat et le cadre d'étude fondamental de l'écologie moderne.

Philippe Choler a insisté sur l'importance de considérer la zone critique comme un tout, plutôt que comme une série de compartiments isolés. Cette approche holistique permet de mieux comprendre les flux d'énergie et de matière qui circulent entre les différents éléments du système, ainsi que les rétroactions qui se produisent à différentes échelles spatiales et temporelles.

Évolution de l'écologie scientifique

L'écologie s'est initialement développée comme une science des relations entre organismes vivants, fortement influencée



PHILIPPE CHOLER est directeur de recherche au CNRS et travaille au laboratoire d'écologie alpine de l'Université Grenoble Alpes. Il a dirigé la Zone Atelier Alpes, un dispositif de recherches inter- et trans-disciplinaires sur les socio-écosystèmes. Ses recherches portent sur l'écologie des écosystèmes de montagne, et plus particulièrement sur les espaces pastoraux supra-forestiers des montagnes européennes. Il s'intéresse notamment aux couplages entre l'enneigement saisonnier, le microclimat et la dynamique des écosystèmes. Ses travaux récents combinent des enquêtes et mesures de terrain avec l'analyse d'images satellite. Il est l'auteur d'une centaine de publications scientifiques. <https://www.philippe-choler.com/>

par des pionniers tels que Alexander von Humboldt, Vladimir Vernadsky et James Lovelock.

Humboldt, au début du 19ème siècle, a été l'un des premiers à observer et décrire les relations entre la distribution des plantes et les conditions climatiques à l'échelle globale. Ses travaux ont jeté les bases de la biogéographie et de l'écologie des communautés.

Vernadsky, au début du 20ème siècle, a introduit le concept de biosphère, soulignant l'influence profonde des organismes vivants sur les processus géologiques et atmosphériques de la Terre. Ses idées ont contribué à une vision plus intégrée des interactions entre le vivant et le non-vivant.

ÉCHOS DES JN

Lovelock, avec son hypothèse Gaïa, a proposé dans les années 1970 que la Terre fonctionne comme un système autorégulé où la vie maintient les conditions nécessaires à sa propre existence. Bien que controversée, cette théorie a stimulé la réflexion sur les interactions à grande échelle entre la biosphère et les composants abiotiques de la Terre.

L'écologie s'est historiquement concentrée sur les interactions biologiques, laissant le lien avec les géosciences insuffisamment exploré.

La toundra comme exemple illustratif remarquable

La toundra est un excellent exemple pour illustrer les interactions complexes au sein de la zone critique. La toundra est un environnement caractéristique des régions arctiques et alpines, offrant un excellent cas d'étude pour comprendre les relations entre le climat, la végétation et les processus biogéochimiques.

La toundra est un système asylvatique, c'est-à-dire sans arbres. Cet environnement se caractérise par des hivers longs, sombres et froids, avec des températures moyennes hivernales pouvant atteindre -34°C . Les étés sont courts, avec seulement 50 à 60 jours de croissance végétale par an. La distribution de la toundra illustre parfaitement les relations complexes entre latitude, altitude et climat. À mesure que l'on se déplace vers les pôles ou que l'on monte en altitude dans les régions tempérées, on observe une transition progressive de la forêt à la toundra. Cette transition est principalement contrôlée par la température, mais d'autres facteurs comme les précipitations, la durée d'enneigement et la force du vent jouent également un rôle important.

Plus précisément, dans la toundra, les arbustes jouent un rôle crucial dans l'influence de processus tels que l'accumulation de neige, la température du sol et l'albédo. Plusieurs boucles de rétroaction illustrent la complexité des interactions dans ce système :

- Piégeage de la neige : les arbustes agissent comme des pièges à neige, créant des accumulations localisées. Cette neige accumulée isole le sol, le protégeant des températures extrêmement basses de l'hiver arctique.
- Effet sur la température du sol : l'isolation fournie par la neige piégée maintient le sol plus chaud en hiver. Cela peut stimuler l'activité microbienne et la décomposition de la matière organique, même pendant la saison froide.
- Modification de l'albédo : au printemps, les branches des arbustes qui émergent de la neige réduisent l'albédo de surface. Cela augmente l'absorption de l'énergie solaire, accélérant la fonte des neiges et le réchauffement du sol.
- Rétroaction positive sur la croissance des arbustes : des sols plus chauds et une saison de croissance plus longue favorisent la croissance et l'expansion des arbustes, ce qui peut à son tour amplifier les effets précédents.

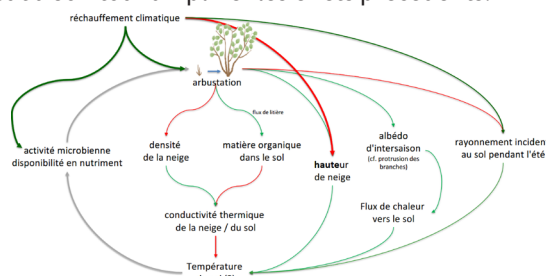


Figure 1 : Les boucles de rétroaction mises en jeu dans « le système » toundra

La végétation de la toundra comprend environ 2000 espèces de plantes, principalement des mousses, des lichens, des carex, des graminées et des plantes à fleurs. Ces plantes ont développé des adaptations remarquables pour survivre dans cet environnement hostile :

- Croissance horizontale : les plantes de la toundra poussent souvent horizontalement plutôt que verticalement. Cette stratégie leur permet de rester proches du sol, où les températures sont plus clémentes et où elles peuvent bénéficier de la protection de la couverture neigeuse en hiver.
- Formes de croissance en coussin : certaines espèces adoptent une forme de croissance en coussin dense, ce qui leur permet de créer leur propre microclimat et de résister aux vents forts.
- Feuilles persistantes : de nombreuses plantes de la toundra conservent leurs feuilles pendant l'hiver. Cela leur permet de commencer la photosynthèse dès que les conditions deviennent favorables au printemps, maximisant ainsi la courte saison de croissance.
- Reproduction végétative : la reproduction par voie végétative est courante dans la toundra, permettant aux plantes de se propager efficacement sans dépendre uniquement de la production de graines, qui peut être aléatoire dans ces conditions difficiles.

Ces adaptations ne sont pas seulement des curiosités botaniques, mais elles ont des implications importantes pour le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble, elles influencent les cycles biogéochimiques et les interactions avec le climat.

Approche fonctionnelle de la biodiversité

Philippe Choler met en avant l'importance de l'écologie fonctionnelle, une approche qui se concentre sur les traits fonctionnels des espèces plutôt que sur leur diversité taxonomique. Cette perspective permet de mieux comprendre et prédire les fonctions écosystémiques, comme la productivité primaire, en tenant compte des compromis fonctionnels entre différentes stratégies écologiques. Les traits fonctionnels sont des caractéristiques mesurables des organismes qui influencent leur performance écologique. Dans le cas des plantes, ces traits peuvent inclure :

- La surface spécifique foliaire (SSF) : c'est le rapport entre la surface de la feuille et sa masse sèche. Une SSF élevée indique généralement une stratégie d'acquisition rapide des ressources, tandis qu'une SSF faible est associée à une stratégie de conservation des ressources.
- La teneur en azote des feuilles : elle est souvent corrélée à la capacité photosynthétique de la plante.
- La hauteur de la plante : elle influence la capacité de compétition pour la lumière.
- La profondeur des racines : elle détermine l'accès aux ressources en eau et en nutriments du sol.

Il existe des compromis fonctionnels, ou "trade-offs", entre différentes stratégies écologiques. Par exemple, les plantes à croissance rapide avec une SSF élevée et une forte teneur en azote foliaire sont généralement plus productives, mais aussi plus vulnérables au stress et aux herbivores. À l'inverse, les plantes à croissance lente avec une SSF faible sont souvent plus résistantes aux conditions difficiles, mais moins compé-



titives dans des environnements riches en ressources.

Cette approche fonctionnelle permet de mieux comprendre comment les changements environnementaux, tels que le réchauffement climatique, peuvent affecter la composition et le fonctionnement des écosystèmes. Elle offre également un cadre pour prédire comment les écosystèmes pourraient répondre à ces changements à l'avenir.

Rôle des grands herbivores

Les grands herbivores jouent également un rôle crucial, comme les rennes ou les caribous, dans la régulation des écosystèmes arctiques. Ces animaux ont un impact significatif sur la structure et la dynamique de la végétation de la toundra, modulant ainsi les effets du réchauffement climatique.

- Limitation de l'expansion des ligneux : le broutage intensif par les herbivores peut freiner la croissance et l'expansion des arbustes, contrecarrant ainsi la tendance à l'arbustification observée dans de nombreuses régions arctiques en réponse au réchauffement climatique.
- Modification de la composition végétale : les herbivores influencent la composition des communautés végétales en favorisant certaines espèces résistantes au broutage au détriment d'autres plus vulnérables.
- Altération des cycles des nutriments : à travers leurs déjections et l'urine, les herbivores redistribuent les nutriments dans le paysage, influençant ainsi la fertilité du sol et la croissance des plantes.
- Compactage du sol : le piétinement par les grands herbivores peut modifier la structure physique du sol, affectant potentiellement les processus hydrologiques et la croissance des plantes.

La présence ou l'absence de grands herbivores peut influencer la réponse de l'écosystème au réchauffement climatique. Par exemple, des expériences d'exclusion des herbivores combinées à un réchauffement artificiel ont montré que l'absence d'herbivores peut accélérer l'expansion des arbustes en réponse au réchauffement. C'est pourquoi, il ne faut pas

négliger le rôle des grands herbivores dans les modèles climatiques car sans cela, cela pourrait conduire à des estimations erronées de l'évolution des écosystèmes arctiques.

Considérations générales et perspectives

Philippe Choler conclut sa conférence en rappelant l'importance d'une approche systémique et interdisciplinaire pour étudier la zone critique. Il insiste sur la nécessité de relier l'écologie avec d'autres disciplines telles que la géologie, la pédologie, l'hydrologie et la climatologie pour obtenir une compréhension holistique du fonctionnement des écosystèmes.

Il met en avant plusieurs points clés pour l'avenir de la recherche en écologie :

- Intégration des échelles : travailler sur des échelles d'analyse convergentes en termes de temps, d'espace et de niveaux d'organisation. C'est souvent aux échelles intermédiaires que les interactions les plus intéressantes entre disciplines peuvent se produire.
- Développement de nouvelles technologies : les nouvelles technologies, telles que la télédétection à haute résolution, les capteurs in situ et les techniques de séquençage génétique, ne pourront qu'améliorer notre compréhension des processus écologiques à différentes échelles.
- Modélisation intégrative : développer de modèles plus intégratifs, capables de prendre en compte les interactions complexes entre les composantes biotiques et abiotiques de la zone critique.
- Considération des rétroactions : prendre en compte les boucles de rétroaction dans l'étude des écosystèmes, en particulier dans le contexte du changement climatique.

Une meilleure compréhension des interactions au sein de la zone critique peut conduire à des stratégies de conservation plus efficaces et à une meilleure anticipation des impacts du changement global ce qui ne pourra passer que par une implication plus importante des politiques de gestion et de conservation des milieux.

Par David Boudeau

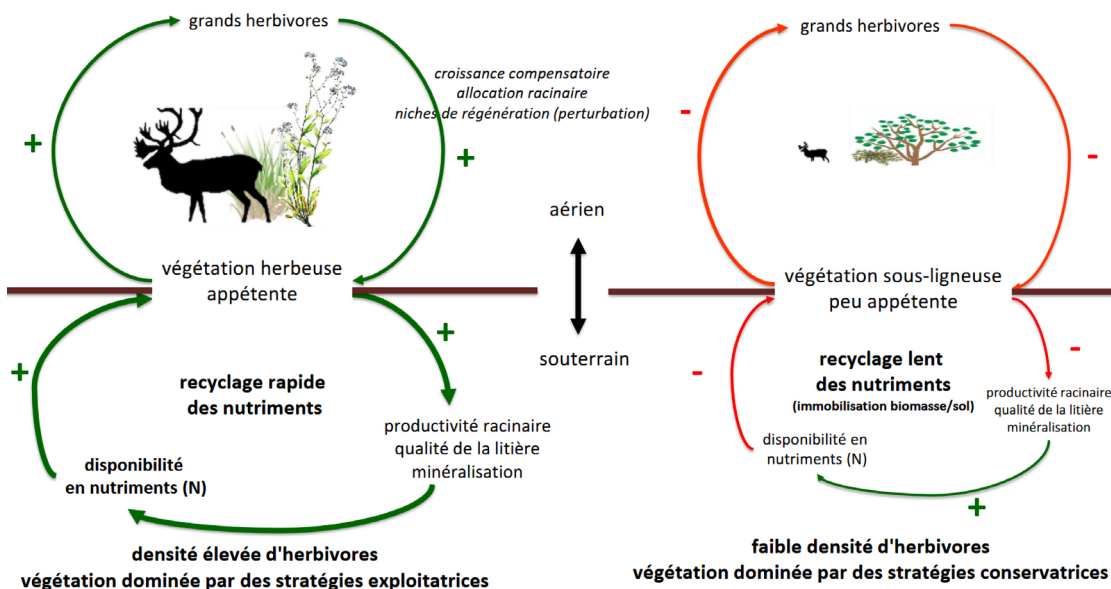


Figure 2 : couplage sol-végétation-herbivores

Conférence 8 - L'altération et la création d'aquifères dans les roches plutoniques et métamorphiques

par Robert WYNS

Lors de sa conférence, Robert WYNS a présenté un concept novateur concernant le rôle des roches plutoniques et métamorphiques dans la création d'aquifères de socle. Habituellement considérées comme non poreuses et non perméables, ces roches peuvent devenir des réservoirs d'eau grâce à un processus d'altération spécifique.

L'altération : un processus clé dans la création d'aquifères

L'altération est un phénomène naturel où les roches sont modifiées par l'action de l'eau, provoquant des changements minéralogiques, chimiques et physiques. Ces transformations ont pour but d'équilibrer la roche avec l'eau qui la traverse. Le résultat de cette altération est une roche modifiée, appelée altérite, dont la composition diffère de celle de la roche d'origine. Plus l'altération dure longtemps, plus ces changements sont prononcés.

Deux processus d'altération : soustractif et additif

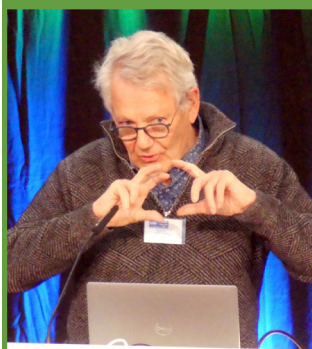
	⊖ ← Altération soustractive	Altération additive → ⊕
Altérites	<p>Profils latéritiques, profils bauxitiques, arènes granitiques</p> <p>Argiles kaoliniques, argiles à silex et à chailles, sables à silex, <i>terra rossa</i>, karstification...</p>	<p>Silcrètes Meulifères</p> <p>Calcrètes</p> <p>Dolocrètes</p> <p>Gypcrètes</p> <p>Sei</p>
Sédiments	<p>Détritique siliceux (graviers, sables, argiles)</p>	<p>Calcaires lacustres</p> <p>Marnes dolomitiques, argiles magnésiennes</p> <p>Evaporites</p>
Géomorphologie	<p>BOMBEMENT LITHOSPHERIQUE</p> <p>Lessivage</p> <p>Niveau de base</p> <p>$SiO_2, K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}$</p>	<p>CUVETTE LITHOSPHERIQUE</p> <p>Evaporation, Précipitation</p>
	500 à 1000 km	

Altération soustractive et additive à l'échelle régionale

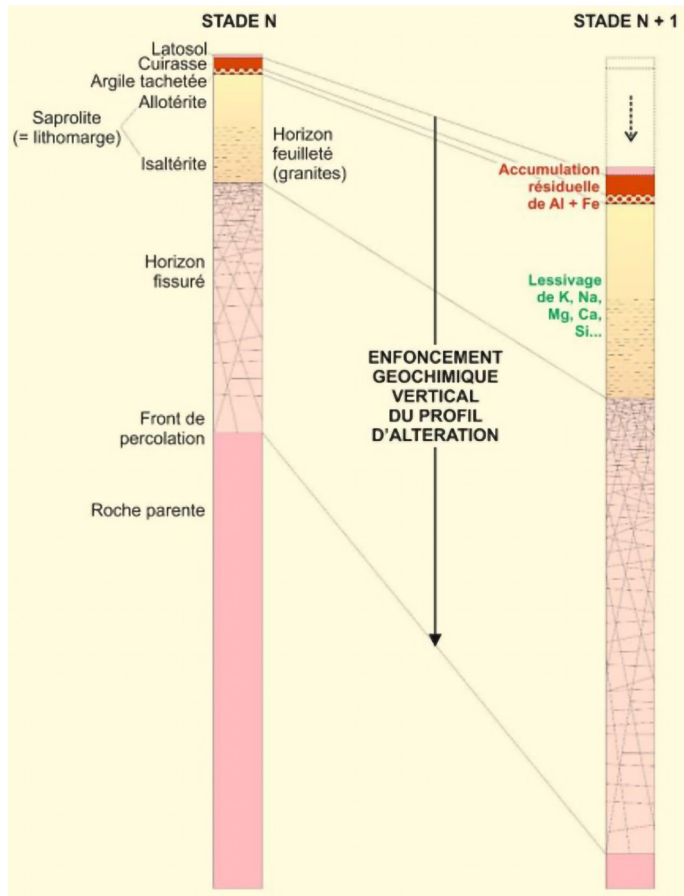
L'altération peut être soustractive ou additive, selon l'endroit où elle se produit. En altitude, dans les zones de bombement lithosphérique, l'eau provoque l'hydrolyse des minéraux, entraînant la dissolution des éléments solubles tels que le silicium, le potassium et le sodium, qui sont ensuite évacués vers les zones basses. Ce processus forme des dépôts de matériaux tels que les profils latéritiques et les argiles à silex.

Dans les cuvettes lithosphériques, les éléments dissous se concentrent, ce qui mène à la formation de roches comme les calcaires lacustres et les marnes. Ce phénomène d'altération additive peut également aboutir à la création d'altérites spécifiques comme les silcrètes et les gypcrètes.

La formation des horizons fissurés : un élément fondamental des aquifères.



ROBERT WYNS est chercheur retraité du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Il a travaillé dans de multiples régions du monde (Europe, Moyen Orient, Afrique, Inde, Corée, Nouvelle Calédonie, Guyane...) et dans des contextes géologiques variés (bassins sédimentaires, socles métamorphiques et plutoniques, chaînes alpines). Il s'est intéressé depuis le début de sa carrière aux paléoaltérations et leurs relations avec les climats et les déformations de la lithosphère. Il a enseigné pendant 20 ans à l'université d'Orléans sur le thème de l'altération et des propriétés physiques des roches affectées par l'altération et a conçu et encadré pendant la même période au BRGM des stages de formation professionnelle sur cette même thématique. Dès la fin des années 1990, ses travaux de recherche ont permis de renouveler les concepts d'aquifères de socle. Ces nouveaux concepts, élaborés avec ses collègues hydrogéologues, ont été validés sur la plupart des continents et ont donné lieu en 2015 à un colloque international sur les aquifères de socle tenu à La Roche sur Yon (Vendée) avec la participation de 120 chercheurs venant de 19 pays et de 5 continents.



Structure et évolution d'un profil latéritique

L'un des points essentiels de la conférence réside dans l'importance de l'horizon fissuré dans les roches altérées, qui constitue un aquifère majeur. Ces horizons fissurés, situés sous la saprolite (roche altérée), permettent à l'eau de circuler à travers des réseaux de fractures qui se forment principalement lors de l'hydrolyse des minéraux. Dans les roches

cristallines comme le granite, des minéraux tels que la biotite, le pyroxène et l'olivine gonflent et génèrent des fissures qui augmentent la perméabilité des roches.

L'évolution des minéraux et leur impact sur la fissuration

Gonflement des minéraux cristallins

Dans les roches cristallines, trois types de minéraux principaux—la biotite, les pyroxènes et l'olivine—gonflent lors de l'hydrolyse. Par exemple, la biotite, courante dans les roches métamorphiques et plutoniques, passe d'une épaisseur de 10 Å à 14 Å lorsqu'elle se transforme en vermiculite, avec un potentiel de gonflement de 40 %. Cette transformation se produit dans un milieu rigide à plusieurs dizaines de mètres de profondeur et génère des contraintes horizontales. Cependant, le gonflement est limité dans ce plan, à moins d'être proche de fissures. Verticalement, le gonflement se produit uniquement si la contrainte due à l'altération dépasse la pression lithostatique (la pression exercée par la masse rocheuse au-dessus).

Formation de boules de granite

Lorsque des diaclases verticales préexistent dans les roches, le gonflement provoque des changements dans l'orientation des contraintes. Près de ces fissures, la dilatation horizontale est absorbée, entraînant un arrondissement progressif de la masse rocheuse. Au fil du temps, ce processus forme des boules de granite. Les fractures radiales, autrefois perméables à l'eau, se referment, et le noyau sphérique ainsi créé est mieux préservé dans l'arène granitique environnante, qui devient plus résistante à l'altération.

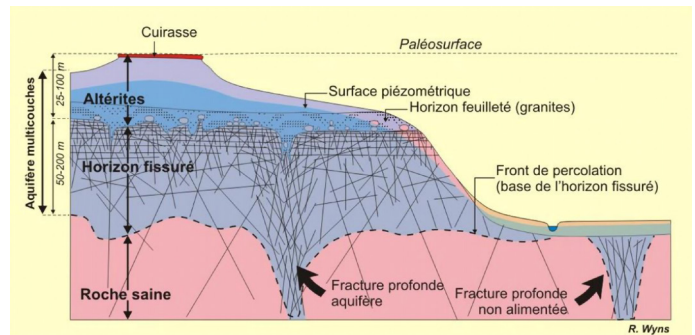
Fracturation des roches foliées

Dans les roches foliées telles que les schistes, micaschistes et gneiss, les orientations des phyllites sont dictées par la structure de la roche. Leur texture litée engendre des plans de faiblesse préférentiels qui favorisent la formation de fractures. Ces fractures ont souvent une géométrie irrégulière, ce qui contribue à la fragilité des roches et leur susceptibilité à la fracturation sous l'effet de l'altération, facilitant ainsi leur transformation en aquifères ou leur altération ultérieure.

Comportement des roches basiques et ultrabasiques

Les roches basiques et ultrabasiques contiennent des minéraux gonflants, comme les pyroxènes et l'olivine, qui peuvent engendrer des fissures à la suite de l'altération. Cependant, les roches paléovolcaniques, les amphibolites et les dolérites, dont les minéraux ont déjà été hydratés avant l'altération, montrent un gonflement limité. En revanche, les basaltes et les gabbros non métamorphiques peuvent développer un horizon fissuré si des minéraux gonflants y sont présents. Les périclites, riches en orthopyroxènes et en olivine, peuvent également gonfler et créer des réseaux

karstiques, tandis que les roches peu altérables comme le quartz, la pegmatite ou la rhyolite subissent une fracturation sous l'effet de l'altération des roches voisines.



Structure typique d'une zone creusée par une vallée quaternaire

Le rôle des techniques modernes dans l'évaluation des aquifères

Les propriétés physiques des roches altérées varient en fonction de la profondeur. En surface, elles sont tendres, tandis que dans l'horizon fissuré, ces propriétés changent avec la profondeur. Cela a été confirmé par des mesures de terrain, telles que le carottage et les mesures des ondes soniques (Vp). Pour mieux comprendre ces processus, Robert Wyns a souligné l'importance des nouvelles technologies. Par exemple, la Résonance Magnétique Protonique (RMP) permet de mesurer la teneur en eau des roches jusqu'à 50 à 100 mètres de profondeur depuis la surface. Cette technique, qui analyse la réponse des molécules d'eau à un champ magnétique, permet de cartographier les ressources en eau et de modéliser les aquifères avec une grande précision.

Un nouveau concept d'aquifère de socle

Le concept d'aquifère de socle, introduit par Robert Wyns, repose sur l'idée que non seulement la saprolite, mais surtout l'horizon fissuré, est une source importante d'eau souterraine. Contrairement à ce que l'on pensait auparavant, l'eau circule horizontalement sur une couche épaisse, permettant une meilleure compréhension de sa circulation dans les roches profondes. Ce modèle a des applications au-delà de l'hydrologie : il peut également être utilisé dans les domaines de la géothermie et des recherches d'hydrocarbures.

Conclusion

La conférence de Robert Wyns a ainsi permis de revoir notre compréhension des aquifères dans les roches plutoniques et métamorphiques. Grâce à l'altération, ces roches, initialement non poreuses, peuvent devenir des réservoirs d'eau importants, un concept qui pourrait transformer les pratiques dans les domaines de l'hydrogéologie, de la géothermie et de la recherche d'hydrocarbures.

Par Julien Hébert

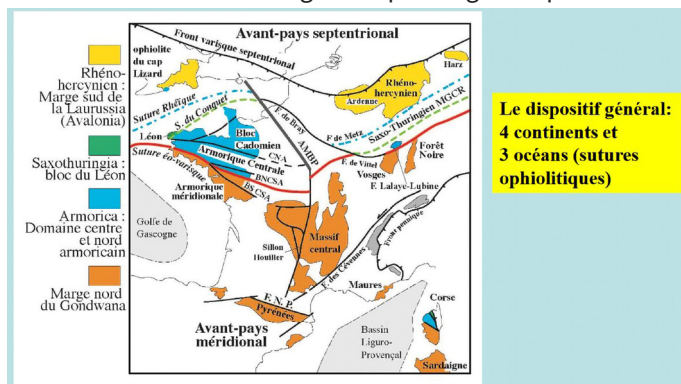
Conférence 9 - La chaîne varisque en France : état des connaissances et questions ouvertes

par Michel FAURE

Les chaînes varisques forment les massifs de Bohême, central, ibérique et le socle des chaînes alpines. La zonation des chaînes varisques du nord vers le sud, se distribue en quatre domaines et trois sutures :

- le domaine Rhéno-hercynien issu du continent Laurussia-Avalonia avec l'Ardenne, la suture Rhéique,
- le domaine Saxo-thuringien issu du microcontinent Saxo-Thuringia avec le Léon, la suture Tépla-Le Conquet,
- le domaine Armorica avec le Massif Armorica central, la suture éo-varisque,
- le domaine Moldanubien issu du continent Gondwana avec le Massif Armorica sud, le Massif Central, les Pyrénées, les Vosges et la Bohême.

Ces chaînes varisques sont polyorogéniques bi-vergentes (au nord, vers le nord et au sud, vers le sud) et possèdent de très nombreux massifs migmatitiques et granitiques.



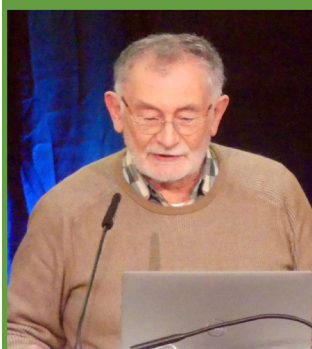
Au Protérozoïque, dans Rodinia, une zone va se séparer du reste : la Pannotia (Laurentia, Groenland, Baltica, Ouest Africa, Amazonia et Rio de la Plata). Puis entre -1 000 Ma et -500 Ma, Pannotia se fracture par l'ouverture des océans Iapétus et Tornquist. Cela mène à 3 continents : Laurentia, Baltica et Gondwana.

Au Néoproterozoïque et début du Cambrien, la subduction de l'océan celtique sous la marge active nord du Gondwana construit la chaîne cadomienne qui sera le socle de certaines chaînes varisques (Massif Armorica, Ardenne).

A l'Ordovicien inférieur, la bordure du Gondwana et de l'Ouest Africa va se fracturer en lanières continentales, faisant apparaître des domaines océaniques (océan Rhéique, océan Tépla-Le Conquet et océan médio-européen).

A l'Ordovicien supérieur, Avalonia entre en collision avec Baltica puis Laurentia, donnant la Laurussia et faisant disparaître l'océan Iapétus. De cette collision sont nées les chaînes calédoniennes (Norvège, Écosse, Amérique du nord).

Au Silurien moyen supérieur, les lanières Armorica et Saxo-Thuringia se rapprochent du Gondwana jusqu'à faire disparaître l'océan médio-européen en formant la chaîne éo-varisque. Puis aura lieu la fermeture de l'océan Rhéique lors de la collision de la Laurussia avec Gondwana.



MICHEL FAURE est professeur émérite à l'université d'Orléans, agrégé de SVT, docteur des universités d'Orléans et de Tokyo. Il étudie la formation des chaînes de montagnes. Ses travaux souvent conduits avec des doctorants concernent les processus d'épaississement, d'amincissement et de fusion de la croûte continentale et la formation de minéralisations.

Après des recherches sur la tectonique du Japon, il s'est investi dans l'étude des chaînes de Chine du Sud et du Vietnam, et de la chaîne varisque d'Europe. Ces activités ont donné lieu à environ 300 publications. Michel Faure est membre honoraire de l'Institut Universitaire de France et lauréat du prix Léon-Lutaud de l'Académie des Sciences.

Le domaine Rhéno-hercynien (Ardenne)

La nappe de Dinant chevauche vers le nord l'autochtone du Brabant, avec comme limite la faille du midi et son bassin houiller parallique. A noter que la discordance siluro-dévonienne sur le cambrio-ordovicien au niveau de la vallée de la Meuse montre la séparation des microcontinents du Gondwana et l'ouverture des océans Rhéique, Tépla-Le Conquet et médio-européen. Au niveau de la faille du pays de Bray, grâce au profil ECORS-Nord de la France, on peut détecter une masse, corrélée à des anomalies de gravité, interprétée comme un reste de la suture Rhéique. La nappe de Dinant montre des déformations importantes de l'Avalonia avec une forte tectonique mais un faible métamorphisme.

Le domaine Saxo-thuringien (Léon)

Le domaine Saxo-thuringien avec son bloc du Léon se situe au sud du domaine Rhéno-hercynien. La limite sud de ce domaine est visible sur la plage du Conquet avec des gabbros et des schistes siliceux assimilés à la suture ophiolitique de Tépla-Le Conquet qui aurait eu lieu vers -360 Ma. Les nappes se sont déplacées du sud vers le nord.

Le domaine Armorica (massif centre et nord armorica)

Le domaine armorica avec sa marge active (domaine ligérien) possède un socle cadomien. Le grès armorica (à l'ordovicien inférieur) est discordant sur les séries plus anciennes : c'est une série post-rift. Puis le Dévonien supérieur a été érodé (phase Bretonne). Enfin, l'unité de Saint Georges sur Loire est la marge continentale active déformée lors de la collision éo-varisque avec le Gondwana. Cette série à blocs de chert, calcaire, grès et surtout basalte, gabbro, andésite et rhyolite montre peut-être l'existence d'un arc ligérien avec son bassin d'arrière arc (le rift du Layon) contigus à l'océan médio-européen qui ont disparu lors de la subduction du Gondwana. Se sont produits ensuite des exhumations de roches gondwaniennes ayant subi un métamorphisme haute pression (éclogites). Ce mouvement est à l'origine des migmatites MI (-390 à -370 Ma). Ce mouvement se fait vers le sud comme le montrent les nappes de Champtoceaux.

Le domaine Moldanubien

C'est une pile de nappes avec de haut en bas, l'unité supérieure des gneiss, l'unité inférieure des gneiss, l'unité para-autochtone, puis la zone des plis et chevauchements qui s'écroule dans le bassin molassique (carbonifère moyen à

supérieur). Cet édifice est traversé en beaucoup d'endroits de massifs granitiques et de dômes migmatitiques. Il est polyphasé et polyorogénique. Il y a trois événements précédés d'un événement précoce D0 (à ultra haute pression), répartis en deux stades :

D0 et D1 cycle éo-varisque au Dévonien moyen avec la collision Armorica Gondwana.

D2 et D3 cycle varisque

Le cycle éo-varisque D0 est caractérisé par un métamorphisme haute ou ultra haute pression dû à la subduction de la croûte continentale amincie (exemple : un méta-gabbro écolotitique à texture coronitique de l'unité supérieure des gneiss à Marvejols).

Le cycle éo-varisque D1 est un épaississement crustal puis une exhumation donnant des amphibolites avec des reliques d'écolotites. Les déplacements des nappes se font vers le sud. Les profondeurs atteintes varient de 3 GPa (faciès écolotite à coésite) à 2 GPa pour l'unité supérieure des gneiss ou 1 GPa pour l'unité inférieure des gneiss. Lors des remontées quasi adiabatiques beaucoup de fusion crustale fabrique les migmatites M1.

Le cycle varisque au dévono-carbonifère se résume à la disparition des océans Tépla-Le Conquet et Rhéique par subduction vers le sud sous le Gondwana et les collisions Laurussia Saxo-Thuringia et Saxo-Thuringia Gondwana. Les déformations produites s'observent surtout dans la plaque supérieure.

L'événement D2 au Famennien-Tournaisien fabrique un arc magmatique (la ligne tonalitique du limousin ou l'arc de la Somme) et un bassin arrière arc océanique (visible dans la Brévenne). Il est caractérisé par un cisaillement ductile vers le nord-ouest et un métamorphisme de moyenne pression (1GPa) et moyenne température (600°C). Il se termine par une mise en place de granites à cordiérite de type Guéret.

L'événement D3 est contrasté : au nord (Brévenne, nord Limousin) c'est une extension (magmatisme anthracifère) et au

sud (Cévennes, Montagne Noire) c'est encore une compression (zone des plis et chevauchements). Cette compression donne des fusions crustales à l'origine des migmatites M1 (vers - 335, - 325 Ma) que l'on trouve au Canigou, à la Montagne Noire, sur le Millevache, dans le Morbihan ou le Léon et dans les Vosges. Au nord, on obtient des tufs anthracifères.

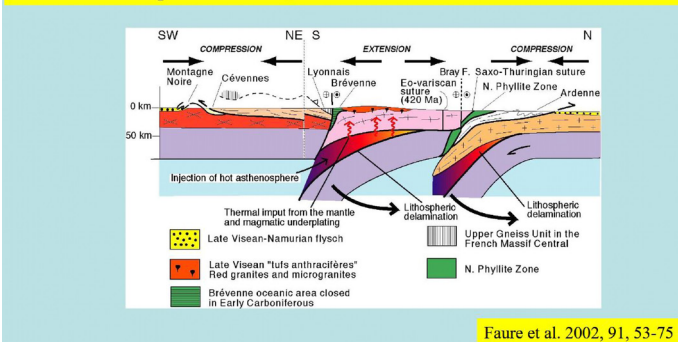
L'événement tardi-varisque D4

C'est la formation de plutons syntectoniques (nord Limousin ou sud Margeride). Sur les bordures des plutons on trouve des mylonites indiquant des mouvements à faille normale. La direction de l'étirement général de la chaîne est nord-ouest / sud-est accommodé de failles normales ductiles qui participent à l'amincissement de la croûte préalablement épaissie par D2 et D3.

L'événement D5 au Carbonifère supérieur - Permien

Origine de la chaleur? Signification géodynamique de la fusion?

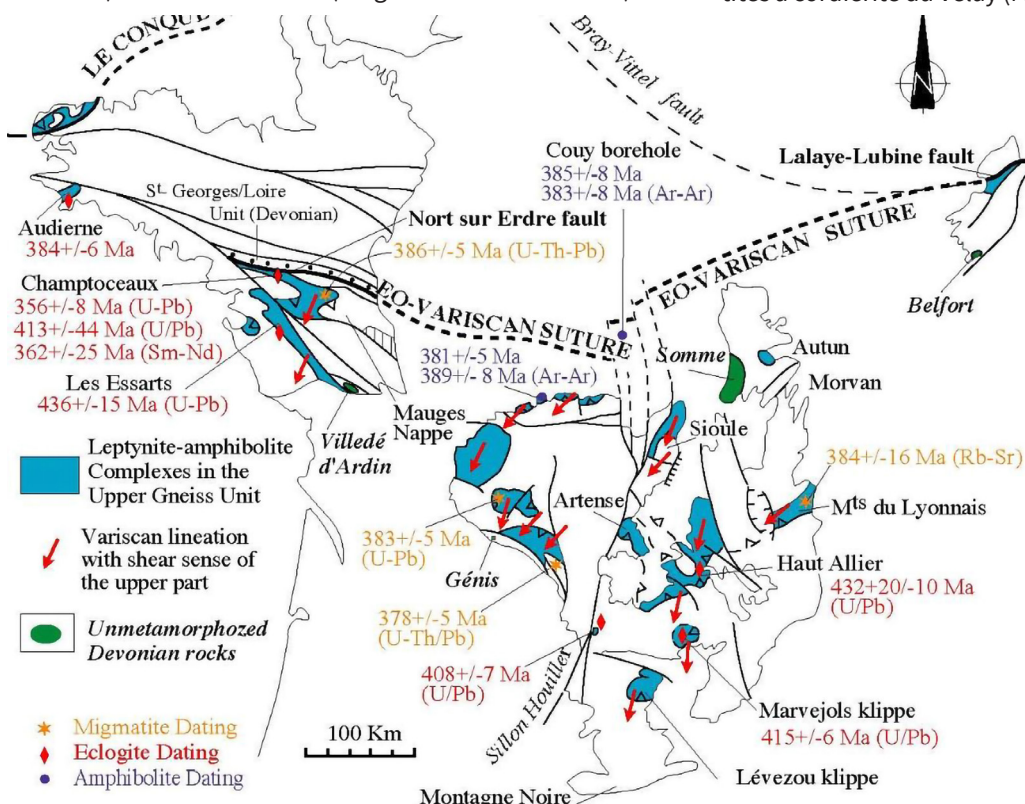
- épaississement: matériaux radiogéniques (U, Th), fluides
 - contribution du manteau: délamination lithosphérique
- un exemple de modèle, il en existe d'autres



Faure et al. 2002, 91, 53-75

Il est caractérisé par des structures linéaires d'étirement direction nord-nord-est / sud-sud-ouest marqueuses des failles bordières des bassins houillers (Saint Étienne, Prades, Graissessac) qui sont transtensifs. Ce sont des indicateurs du collapse de la chaîne. En profondeur, on trouve des migmatites à cordiérite du Velay (MIII), des failles normales ductiles, des lamprophyres, des granulites (visibles en enclaves dans les laves des puys). Grâce à une délamination du manteau lithosphérique, l'asthénosphère s'engouffre et apporte la chaleur nécessaire à la formation de ces MIII.

Par Rémy Thomas



Carte illustrant les différences domaines

Conférence 10- les ressources minérales de la transition énergétique

par Cédric PHILIBERT

Les questions ou affirmations que l'on entend dans les médias sont perturbantes : « la transition énergétique va-t-elle manquer de ressources ? » ... « continuer à faire croire qu'il est possible de supprimer les émissions de carbone en électrifiant le système énergétique mondial est un mensonge criminel ! » ...

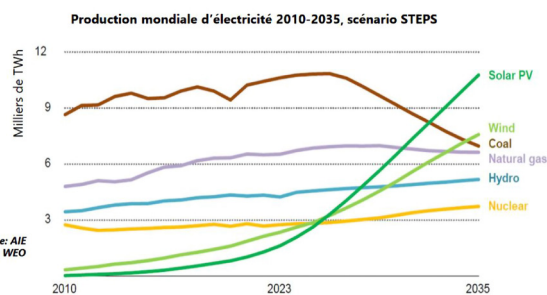
Ces phrases montrent, alors qu'on observe une baisse du climato-scepticisme, une augmentation des attaques contre les solutions de la transition énergétique. Les arguments proviennent essentiellement de think tanks états-uniens financés par des industries pétrolières. Ces avis étant repris ultérieurement à la fois par les tenants du tout nucléaire, et à l'opposé, par les partisans d'une décroissance radicale.

Il est vrai que les questions des ressources minières de la transition sont réelles : problème du rythme d'approvisionnement, géostratégie, forte dépendance à la Chine.

Mais la réalité serait celle-ci : si on veut arrêter les ressources fossiles il faut électrifier les bâtiments, les industries, les transports et donc développer massivement l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité...

Dans le scénario STEPS, la part du renouvelable devrait être de 40% en 2030, la capacité photovoltaïque atteindre 1000 TWh en 2025 et le pic fossile en vue marqué par une baisse importante du charbon.

Le solaire, puis l'éolien, dépasseront le charbon et le gaz



Dans le scénario NET ZERO 2050 de l'agence internationale de l'énergie (AIE), la part de l'électricité dans la demande finale d'énergie passerait de 20 à 50%.

Favorablement, on observe une baisse importante des coûts des énergies renouvelables : par exemple le photovoltaïque est passé de 414\$ à 44\$ par MWh entre 2009 et 2023.

Cependant les techniques de production des énergies renouvelables et des véhicules électriques nécessitent des métaux particuliers : cuivre, lithium, nickel, manganèse, cobalt, graphite, terres rares... C'est la demande en lithium qui devrait augmenter le plus : plus de 42 fois entre 2020 et 2040.

Peut-on craindre un décalage entre l'offre et la demande ? Cédric Philibert nous affirme que non, car les techniques d'extraction ont été améliorées et on exploite des gisements à plus faible teneur. En conséquence, les réserves augmentent. Exemple du cuivre : en 1970 l'extraction se faisait à une teneur de 1,7%, les réserves étaient estimées à 280 Mt et les ressources à 1,6 Gt. En 2023 l'extraction se fait désormais à 0,65%, en conséquence les réserves s'estiment à 1000 Mt et



CÉDRIC PHILIBERT est chercheur associé au centre énergie climat de l'Institut Français des Relations Internationales. D'abord journaliste, il a été conseiller du ministre français de l'environnement, puis du directeur général de l'ADEME. Il a publié en 1990 chez Calmann-Lévy un livre sur le changement climatique : *La Terre brûle-t-elle ?* puis *Du Neuf sous le Soleil*. Il a ensuite rejoint le programme des nations-unies pour l'environnement, puis l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Il y a travaillé pendant 20 ans, rédigé de nombreuses publications, dont *Beyond Kyoto* (2002), *Act Locally Trade Globally* (2005), *Solar Energy Perspectives* (2011) et *Renewable Energy for Industry* (2017).

les ressources à 5,5 Gt. L'extraction est plus efficace avec la même quantité d'énergie. Par ailleurs, on a amélioré nettement les méthodes de recyclage !

Le gros problème, qui est politique, c'est la très forte dépendance envers la Chine qui domine actuellement le raffinage de ces métaux. Cédric Philibert affirme que la transition énergétique est ainsi bien engagée et qu'elle devrait être rapide.

Par Serge Lacassie

Définitions des divers scénarios de l'Agence internationale de l'Énergie
STEP : Le scénario des politiques déclarées (STEPS) vise à esquisser la tendance générale de l'évolution du système énergétique en se basant sur une analyse approfondie du paysage politique actuel. Il offre une évaluation détaillée, secteur par secteur, des politiques déjà mises en place pour atteindre les objectifs déclarés ainsi que d'autres cibles liées à l'énergie. Ce scénario prend en considération non seulement les politiques et mesures actuelles, mais aussi celles en cours d'élaboration. Contrairement au scénario des engagements annoncés (APS), le scénario STEPS adopte une approche plus prudente pour l'avenir, ne considérant pas comme acquis l'accomplissement de tous les objectifs annoncés par les gouvernements. À l'instar de l'APS, il n'a pas pour but d'atteindre un résultat spécifique.

APS : Le scénario des engagements annoncés, lancé en 2021, offre une perspective sur la capacité des ambitions et des objectifs proclamés à générer les réductions d'émissions nécessaires pour atteindre des émissions nettes nulles d'ici 2050. Il intègre toutes les déclarations nationales importantes faites jusqu'à la fin d'août 2023, qu'elles concernent des objectifs à l'horizon 2030 ou des engagements à plus long terme en faveur de la neutralité carbone, qu'elles soient ancrées dans la législation ou définies dans des contributions nationales déterminées. Dans ce cadre, les pays mettent en œuvre pleinement et dans les délais impartis leurs objectifs nationaux. Les perspectives des exportateurs de combustibles fossiles et de carburants à faibles émissions, tels que l'hydrogène, dépendent des effets de ces objectifs sur la demande mondiale. Ce scénario suppose également que tous les objectifs nationaux concernant l'accès à l'électricité et à des sources d'énergie propre sont atteints pleinement et dans les délais impartis.

NZE : Le scénario Net Zero Emissions se présente comme un guide vers un avenir avec lequel le secteur énergétique mondial parviendrait à neutraliser complètement ses émissions de CO₂ d'ici à 2050. Ce changement serait réalisé progressivement, les économies avancées prenant la tête. En suivant ce scénario, il serait possible d'atteindre les objectifs clés du développement durable liés à l'énergie. Cela inclut l'accès universel à l'énergie d'ici à 2030 et une nette amélioration de la qualité de l'air. De plus, cette approche contribuerait à limiter l'élévation de la température globale à 1,5 °C, avec une probabilité d'au moins 50 %. Cela s'alignerait avec les réductions d'émissions préconisées dans le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Informations du site Watted.ch

Conférence 11- L'Océan, quels enjeux ?

Par Françoise Gaill



Françoise Gaill nous explique que bien que l'océan couvre deux tiers de la surface terrestre, son volume relatif est faible comparé à celui de la Terre. Pourtant, il contient 97 % de l'eau de la planète et génère 50 % de l'oxygène que nous respirons. Les écosystèmes marins sont riches et mystérieux : seuls 5 % des fonds marins ont été cartographiés, et moins de trois humains ont exploré des profondeurs supérieures à 11 000 mètres. Actuellement, 230 000 à 250 000 espèces marines sont identifiées, mais leur nombre réel pourrait égaler ou dépasser celui des espèces terrestres. L'océan est un pilier de la biosphère, représentant 90 % de l'habitat favorable à la vie sur Terre, et demeure en grande partie inexploré.

L'océan joue un rôle crucial dans la régulation du climat et contribue à limiter le réchauffement climatique. 2015 a été une année clé pour l'environnement, avec la COP21 à Paris, l'adoption des Objectifs de développement durable (ODD) pour 2030, et la publication du premier rapport mondial sur les océans. Cette année a aussi marqué le début des discussions aux Nations Unies sur la biodiversité en haute mer, menant à l'Accord BBNJ (Biodiversity Beyond National Jurisdiction). Les défis pour les océans, identifiés lors du World Economic Forum, incluent le changement climatique, la pollution, la surpêche et la perte de biodiversité. 2015 a également vu l'océan reconnu comme un écosystème essentiel dans l'Accord de Paris.

L'océan, essentiel à la vie sur Terre, est fortement impacté par le changement climatique. Les anomalies de température de surface océanique augmentent régulièrement, une tendance qui a conduit le Secrétaire général des Nations Unies à déclarer une urgence Océans. En réponse, la troisième Conférence Océans se tiendra prochainement à Nice, co-organisée par la France et le Costa Rica.

Depuis deux siècles, la température de l'océan s'est accrue de manière quasi linéaire, absorbant 93 % de la chaleur issue des émissions de gaz à effet de serre. L'océan agit comme un puits de carbone, capturant entre 26 % et 30 % du CO₂ émis, mais cela entraîne des conséquences graves : acidification des eaux, perte d'oxygène, et déséquilibres climatiques.

Le dernier rapport du GIEC met en garde contre la multiplication des événements climatiques extrêmes, qui deviennent de plus en plus fréquents. Ce qui survenait autrefois une fois par siècle pourrait désormais arriver chaque décennie, voire chaque mois, soulignant l'urgence d'agir pour préserver l'océan et limiter les impacts du réchauffement climatique. Or, le changement climatique impacte la biodiversité marine de multiples façons : migration des espèces des zones tropicales vers des régions plus tempérées, disparition massive des récifs coralliens, et déclin des populations halieutiques (poissons et autres espèces marines sauvages). Cette érosion de la biodiversité altère gravement les services écosystémiques, qui incluent la régulation climatique, l'approvision-



FRANÇOISE GAILL est docteure d'état en biologie animale de Sorbonne Université et du Muséum national d'histoire naturelle. C'est une spécialiste des écosystèmes profonds ayant développé des méthodes biophysiques et identifié des mécanismes moléculaires et cellulaires d'adaptation à ces environnements extrêmes. Elle a réalisé de nombreuses campagnes océanographiques internationales avec des sous-marins habités ou téléopérés pour travailler sur l'adaptation aux milieux extrêmes. Après avoir dirigé le département environnement et développement durable, elle a créé l'institut écologie et environnement (Inee) à la direction du cnrs. Elle a présidé le comité recherche et innovation du Grenelle de la mer et le comité scientifique et technique de la flotte océanographique française. Cette scientifique a participé pour le gouvernement français à plusieurs négociations des Nations Unies sur le climat, le développement durable ou la gouvernance de la haute mer. Elle est présidente de plusieurs conseils scientifiques dont celui de l'observatoire national de l'éolien en mer. Elle est actuellement vice présidente de la plateforme océan et climat, conseillère scientifique au cnrs pour l'Inee et préside la Fondation Ocean Sustainability abritée par la fondation cnrs. Membre du Conseil Présidentiel de la Science, elle est également grand officier dans l'ordre national de la légion d'honneur et commandeur dans celui du mérite

nement alimentaire, et des ressources essentielles à l'énergie et à la santé humaine.

Les récifs coralliens, par exemple, apportent des bénéfices économiques considérables, évalués à 114 millions d'euros annuellement en Guadeloupe. De fait, les coraux génèrent de l'argent de manière indirecte. Par exemple, ils amortissent les vagues lors des tempêtes, ce qui réduit les coûts des dégâts causés par ces événements. De plus, les récifs coralliens sont des habitats riches en biodiversité, soutenant de nombreuses espèces marines, ce qui bénéficie à l'industrie de la pêche et au tourisme. Cette valeur économique des coraux, ainsi que d'autres ressources naturelles comme les baleines, peut être quantifiée pour démontrer leur impact financier positif. Cependant, des débats existent quant à l'évaluation économique de la nature, certains peuples autochtones la percevant comme incompatible avec leur vision spirituelle et culturelle. Cela a mené à une évolution conceptuelle des "services écosystémiques" vers les "contributions de la nature à la société."

Les mangroves, les coraux et autres forêts marines jouent aussi un rôle clé dans la captation du carbone, connu sous le terme de carbone bleu. Enfin, les ressources génétiques marines suscitent un vif intérêt scientifique et économique.

Les zones de biodiversité élevée, identifiées comme hot spots, font l'objet d'expéditions pour breveter des séquences génétiques, avec une concentration notable des brevets dans les pays du Nord, notamment en Europe et aux États-Unis. Les services écosystémiques liés aux zones océaniques soulèvent des enjeux majeurs concernant l'accès aux ressources génétiques, notamment en matière de brevets de séquences génétiques. Ces séquences, qui ne sont pas des organismes vivants, mais des morceaux de génome, peuvent avoir une utilité, ce qui suscite des débats complexes sur la

ÉCHOS DES JN

manière dont ces brevets sont gérés. Les recherches financées par des groupes pharmaceutiques sur des animaux marins ont abouti à la dépose de nombreux brevets, dont 90% proviennent de ces espèces. Toutefois, ces brevets sont souvent privés, bien que la recherche publique en soit l'origine, ce qui a provoqué des débats sur la nécessité de partager ces brevets de manière plus équitable. Cette question fait actuellement l'objet de discussions au sein des Nations Unies et de la Convention sur la diversité biologique (CDB).

Les ressources marines, en particulier celles des grands fonds, occupent une place importante dans les discussions internationales. Ces ressources comprennent les nodules polymétalliques (présents dans les plaines abyssales), les dépôts de cobalt-fer (dans les zones émergentes) et les ressources métalliques associées aux sources hydrothermales. Ces découvertes ont conduit à la reconnaissance de l'océan comme un "patrimoine commun de l'humanité" lors de la Convention de Montego Bay en 1982, marquant une étape clé dans la gestion collective des ressources marines.

En parallèle, des initiatives comme le 30 by 30 visent à protéger 30 % des océans d'ici 2030, via des aires marines protégées, soulignant l'importance de la biodiversité marine et de la conservation des écosystèmes. Les défis contemporains incluent la pollution plastique, l'impact des transports maritimes (90 % des marchandises transitent par les océans) et la sécurisation des infrastructures numériques sous-marines.

L'océan est vu à la fois comme un espace vital, une source de ressources variées et un bien commun de l'humanité. Contrairement au concept de patrimoine, le "bien commun" est perçu comme plus souple et inclusif, intégrant les intérêts des populations humaines tout en insistant sur la nécessité de protéger l'environnement marin dans un contexte anthropique marqué par l'intervention croissante de l'homme dans les écosystèmes naturels.

L'océan joue un rôle crucial comme régulateur climatique en absorbant la chaleur et le dioxyde de carbone. Cependant, des questions majeures se posent sur la durabilité de cette fonction et ses impacts sur la circulation thermohaline, essentielle à l'équilibre climatique mondial. En parallèle, les écosystèmes marins, comme la barrière de corail, subissent des pressions combinées du changement climatique et des activités humaines, menaçant leur viabilité.

Pour répondre à ces défis, des initiatives globales ont émergé, notamment les Objectifs de Développement Durable (ODD), visant à conjuguer climat, biodiversité et développement durable. Des projets innovants, tels que Tara Océans et les militaires de la Mission Bougainville, illustrent des approches scientifiques transformantes, en associant exploration, formation et partenariats public-privé. L'idée des sciences participatives est mise en pratique à travers des projets comme "Plancton Planète", qui implique des voiliers et leurs équipages. Ces derniers utilisent un kit de collecte simple pour recueillir des données sur le plancton, un projet qui a attiré l'attention de la marine en raison de sa facilité de mise en place. Ces initiatives encouragent une compréhension génomique de la biodiversité et sensibilisent des acteurs comme les militaires à la protection des écosystèmes marins.

La gouvernance des océans reste fragmentée, avec différentes institutions (OMI, FAO, UNEP) traitant des aspects spécifiques sans une approche holistique. Pour remédier à cela, des scientifiques préconisent la création d'un International Panel for Ocean Sustainability pour anticiper l'évolution des

océans et proposer des solutions durables.

Enfin, l'accent est mis sur la nécessité de renforcer la connaissance et sa diffusion pour comprendre les usages futurs de l'océan. L'objectif est d'intégrer les enjeux environnementaux dans une stratégie globale d'ici 2030, tout en luttant contre des menaces telles que la pollution plastique et l'intensification des activités humaines en zones côtières et maritimes.

Les zones profondes du fond marin sont soumises à une réglementation stricte. Toute exploration nécessite l'autorisation de la Fondation des Mines, mais l'exploitation des ressources est actuellement interdite. Cependant, certains pays, comme le Canada, poussent pour l'exploitation, en contournant les accords existants. Le débat est intense, et la France s'oppose fermement à l'exploitation des ressources marines, soutenue par une coalition de 30 pays en faveur d'un moratoire. Ce moratoire vise à reporter l'exploitation des grands fonds marins jusqu'à ce qu'une meilleure compréhension des impacts environnementaux soit obtenue. Les zones économiques exclusives, cependant, relèvent de la souveraineté des États, comme la Norvège, qui a autorisé l'exploitation malgré l'opposition scientifique. Ce choix soulève des préoccupations, car l'exploitation pourrait affecter des zones en haute mer, une zone internationale. Le débat autour de l'exploitation des ressources marines est donc particulièrement complexe et en pleine évolution.

Il est crucial de protéger la connectivité dans l'océan, c'est-à-dire les corridors qui permettent aux espèces marines de circuler entre différentes zones. Par exemple, des animaux vivant à 2600 mètres de profondeur peuvent voir leurs larves remonter jusqu'à la surface avant de redescendre, ce qui illustre l'importance de maintenir ces connexions pour la biodiversité. Actuellement, les zones marines protégées ne peuvent être établies que dans les zones économiques exclusives, car ce sont les États qui en ont la décision. En Méditerranée, moins de 1 % des zones marines protégées sont réellement protégées, ce qui alimente un grand débat, notamment au sein de l'Europe, où des efforts sont faits pour catégoriser les zones marines protégées selon les standards de l'UICN, allant de très hautement protégées à peu protégées.

L'océan cache des éléments invisibles mais cruciaux, comme les câbles sous-marins, les stations d'exploration et l'exploitation des grands fonds marins. Ces activités sont souvent menées sans prendre en compte leurs impacts à long terme. Malgré cela, l'océan est un milieu foisonnant de vie. Les découvertes récentes ont révélé des formes de vie étonnantes, telles que des organismes utilisant la chimiosynthèse pour se nourrir, en transformant des sulfures en énergie, une découverte clé pour comprendre comment la vie peut s'adapter à des environnements extrêmes.

L'adaptation du vivant à des conditions extrêmes (température, pression, absence d'oxygène) dans ces écosystèmes profonds souligne la résilience de la nature. Cela offre des perspectives d'espoir face aux défis environnementaux actuels, notamment en termes de biotechnologie et de santé, comme l'isolement d'un antibiotique prometteur dérivé de bactéries vivant dans ces conditions extrêmes.

En conclusion, l'océan est une métaphore pour repenser l'avenir des sociétés humaines, notamment en matière de durabilité et d'innovations scientifiques liées à la santé et à l'environnement.

Par Julien Hébert

Mise en ligne de deux conférences

Comme en 2023, nous avons mis en ligne deux des 11 conférences de l'édition 2024.

La conférence de Mathilde CANNAT ayant pour thème « La tectonique des plaques océaniques, un mécanisme fondamental du système Terre ».

Dans sa présentation, **Mathilde CANNAT** précise que la notion de système Terre est de plus en plus utilisée comme le cadre approprié pour étudier notre planète, considérée comme un système régi par des interactions complexes entre atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère. Cette approche a émergé de l'étude des bouleversements climatiques et biologiques récents, liés aux activités humaines et se produisant sur des échelles de temps très courtes. Elle est également appropriée pour les échelles de temps beaucoup plus longues de la tectonique des plaques. En réponse à la dynamique interne de la Terre, la tectonique des plaques conduit au renouvellement constant des grands fonds océaniques, c'est à dire de l'interface rocheuse entre terre interne, océan et vie. Ainsi, sur quelques centaines de millions d'années (à comparer aux 4.5 milliard d'années de l'âge de la Terre), la nouvelle lithosphère formée aux dorsales océaniques est engloutie et recyclée dans le manteau aux zones de subduction. Mathilde CANNAT montre qu'à toutes les étapes de ce cycle, roches, océan et vie interagissent et ces interactions affectent la vie dans les grands fonds, mais aussi la chimie des océans, la composition même du manteau terrestre.



La conférence de Cédric PHILIBERT ayant pour thème « Des ressources minières de la transition énergétique ».

Dans sa présentation, **Cédric PHILIBERT** montre la réalité de la transition énergétique en cours, aux plans mondial, européen et français. Le développement des énergies du soleil et du vent, et l'électrification des bâtiments, de l'industrie et des transports a enfin amené les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) à un sommet en 2023. Elles devraient commencer à régresser mais la route est encore longue vers le « zéro émissions nettes » nécessaire pour arrêter le changement climatique à un niveau encore (presque) supportable.

Cédric PHILIBERT discute en particulier de la disponibilité des matériaux nécessaires à la poursuite de ces évolutions. Si le rythme de leur extraction, et la dépendance de l'Europe aux pays producteurs de métaux raffinés, posent de véritables problèmes, en revanche aucune limite géologique ne devrait s'avérer insurmontable au cours des prochaines décennies, ni créer des besoins énergétiques pouvant contrarier la réduction des émissions de GES.



La chaîne Youtube de l'APBG

Sur la chaîne youtube de l'APBG, vous trouverez également les vidéos des conférences des éditions passées ainsi que d'autres documents utiles et intéressants pour la formation continue des enseignants.

