



Volume 4 / 2023-2024

"Nous avons imaginé un journal pluridisciplinaire dans lequel des chercheur.e.s pourraient publier leurs articles dans une version « vulgarisée », en accès libre. Ces articles vulgarisés seraient ensuite validés après un travail de relecture de collégien.ne.s, et/ou lycéen.ne.s mis.e.s en contact avec le.la chercheur.e."

journal-decoder.fr

Sommaire

Quelques mots de l'équipe éditoriale (page 3)
Témoignage de Mylène DUTOUR, nouvelle membre de
l'équipe éditoriale (page 4)

Les articles 2023/2024

L'activation du récepteur aux cannabinoïdes de type 2
favorise la production de spermatozoïdes in vitro (page 5)

Le milieu de vie aquatique des premiers tétrapodes : une
histoire de delta ? (page 23)

Les dinosaures couvaient-ils leurs œufs ? (page 38)

Évaluation quantitative de l'effet des activités humaines et du
climat sur l'érosion de la Zone Critique alpine au cours des
2000 dernières années (page 51)

Les posters 2023/2024

Le passé de Mars : propice à la vie ? (page 70)

Projections à haute résolution de la chaleur ambiante pour
les grandes villes européennes à l'aide de différentes
métriques de chaleur (page 71)

C'est toujours un petit moment de fierté de vous faire parvenir le dernier volume du journal DECODER, aujourd'hui le 4ème. D'abord parce que ça signifie que l'action entreprise avec les chercheur·se·s et les enseignant·e·s séduit toujours, et car c'est l'opportunité de vous faire découvrir une nouvelle fois plein de thématiques variées ! Nous espérons que les 4 articles et les 2 posters de ce volume sauront aiguïser votre curiosité, voire vous encouragerons à vous (re)lancer dans l'aventure avec nous.

La grande nouveauté cette année a été l'inscription du journal au Pass'Culture. Nous remercions tous les établissements d'avoir joué le jeu de participer au fonctionnement de l'association via une inscription modeste qui nous permettra à terme, nous l'espérons, de pouvoir financer des trajets pour les chercheur·se·s vers les classes.

Nous avons pu également en profiter pour améliorer notre site internet : la recherche d'article publié est maintenant facilitée et une carte du monde rassemble les différents laboratoires et établissements scolaires ayant ou participant à l'aventure DECODER. Notez que DECODER est présent sur trois continents 😊.

Enfin, une fois n'est pas coutume, nous ne donnons pas cette année la parole à un duo de chercheur·se/enseignant·e lors de notre traditionnel témoignage introductif du volume, mais à Mylène Dutour, chercheuse au LEHNA qui nous fait l'honneur de nous rejoindre au sein de l'équipe éditoriale ! C'est avec grand plaisir que nous l'accueillons afin de nous aider dans notre action tout en apportant un vent de fraîcheur dans nos projets et dans nos relations avec vous ! Bienvenue à elle !

Toute l'équipe de DECODER remercie chaleureusement tou·te·s les participant·e·s au projet, car nous en sommes convaincus : c'est par le partage de la connaissance que nos sociétés pourront avancer

L'équipe (agrandie 😊) de DECODER

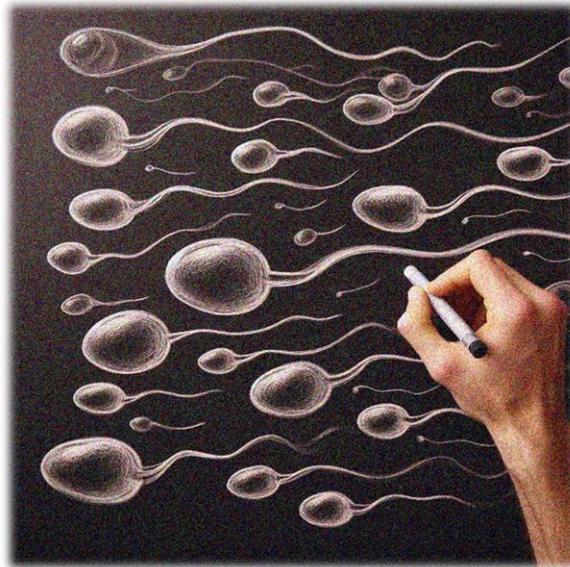
Témoignage

Mylène DUTOUR, nouvelle membre de l'équipe éditoriale

Pourquoi j'ai souhaité rejoindre l'aventure DECODER ?

Rejoindre DECODER est pour moi une occasion de contribuer à la mission essentielle de vulgarisation, diffusion et sensibilisation à la démarche scientifique. Dans un contexte où une partie du public remet en question la science et doute des résultats des chercheurs, il est plus que jamais nécessaire de restaurer la confiance en la science en la rendant plus accessible, claire et engageante. C'est précisément ce que propose DECODER : aborder des sujets complexes de manière inclusive et éclairer les enjeux actuels et futurs. Ce journal a pour objectif de rendre la science gratuite, compréhensible et engageante pour un large public, en la démystifiant et en la rendant accessible au-delà des cercles d'experts. Ce qui me touche particulièrement, c'est l'opportunité de collaborer avec des collégien.ne.s et lycéen.ne.s, en les impliquant dans la co-écriture d'articles aux côtés des chercheurs. Les jeunes, en tant qu'acteurs de demain, doivent être sensibilisés dès aujourd'hui à la démarche scientifique, à l'esprit critique et à la rigueur. Les intégrer à ce processus leur permet de mieux comprendre les enjeux scientifiques contemporains et de nourrir leur curiosité pour les défis de demain. C'est donc avec enthousiasme que je rejoins l'aventure DECODER, désireuse de contribuer activement à la démocratisation de la science, et à la lutte contre la désinformation, en offrant un espace où les questions et les débats sont traités avec sérieux et clarté.

L'activation du récepteur aux cannabinoïdes de type 2 favorise la production de spermatozoïdes *in vitro*



Dr. Ludovic Dumont¹ (Ingénieur de Recherche) et la classe de 1^{ère} – Terminale du lycée Groupe Scolaire Sévigné de Mme Joséphine Villain Sawadogo² (*la liste des élèves est mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article : Dumont L, Rives-Feraïlle A, Delessard M, *et al.* Activation of the cannabinoid receptor type 2 by the agonist JWH133 promotes the first wave of *in vitro* spermatogenesis. *Andrology*. 2021 Mar;9(2):673-688.

Institutions : ¹Université de Rouen, Inserm U1239 – Différenciation et Communication Neuroendocrine Endocrine et Germinale (NorDiC), 25 Rue Lucien Tesnière, 76130 Mont-Saint-Aignan

²Groupe Scolaire Sévigné, 20 rue de la Sous-Préfecture 60200 Compiègne

Résumé :

Cet article a été écrit par 13 élèves de l'Institution Sévigné de Compiègne avec leur professeur de SVT à partir d'une étude menée par l'équipe où travaille le Docteur Dumont et avec sa collaboration. Ils se sont intéressés à un article qui démontre que l'activation du récepteur aux cannabinoïdes de type 2 favorise la production de spermatozoïdes *in vitro*. Grâce à cette réécriture, les élèves ont pu apprendre le rôle majeur des endocannabinoïdes et du récepteur de cannabinoïdes de type 2 dans le développement des cellules germinales pendant la première vague de la spermatogenèse chez la souris.

Mots clés : récepteur aux cannabinoïdes ; spermatogénèse ; spermatozoïdes ; culture organotypique ; ploïdie

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



I État de l'Art et Introduction

Le taux de survie après un cancer chez l'enfant a augmenté grâce aux progrès remarquables réalisés dans le diagnostic et le traitement du cancer. Malheureusement, les traitements de cancers du jeune garçon ont des effets secondaires indésirables irréversibles sur les cellules souches spermatogoniales (CSS) du testicule, entraînant une infertilité à l'âge adulte. C'est pourquoi avant d'entamer un traitement pouvant être néfaste et provoquant l'infertilité du jeune garçon, il lui est proposé une conservation par congélation de son tissu testiculaire. A partir de cellules souches spermatogoniales, une des stratégies potentielles de restauration de la fertilité est de produire des spermatozoïdes *in vivo* (au sein du vivant) ou *in vitro* (sous verre). Cette technique reste de l'ordre de la recherche et ne fonctionne pas encore actuellement sur du tissu humain. La spermatogénèse (Figures 1 et 2) *in vitro* a été réalisée en laboratoire chez la souris avec la technique de culture organotypique (toute ou partie d'un organe) et permet un avantage (*i*) par sa durée de culture qui assure la production de spermatozoïdes *in vitro* à partir de CSSs et (*ii*) car elle contient toutes les cellules germinales et somatiques dans leur configuration physiologique.

De façon plus explicite, des enfants atteints de cancer vont subir des traitements qui seront néfastes pour leurs testicules (gonadotoxicité). Afin de préserver leur fertilité, les chercheurs congèlent un bout de leur testicule (composé de cellules souches uniquement car ces enfants ne sont pas encore pubères et ne possèdent pas encore

de spermatozoïdes). Lorsque ces enfants seront devenus adultes et qu'ils auront un projet parental, une des solutions envisageables pour leur permettre d'enfanter est de transformer leurs cellules souches en spermatozoïdes pour ensuite effectuer une fécondation *in vitro* (FIV). Au laboratoire, l'équipe de recherche a travaillé depuis plus de 10 ans sur la congélation (qui fonctionne maintenant très bien, même chez l'humain). Cependant, la production de spermatozoïdes à partir de cellules souches chez l'humain n'est pas encore applicable et le rendement chez la souris reste encore faible.

Des recherches effectuées en laboratoire chez la souris (Figure 3) ont mis en évidence la possibilité de générer *in vitro* une spermatogénèse complète et fonctionnelle (avec l'obtention d'une descendance) à partir de tissus de souriceaux prépubères (6 jours) après 30 jours de culture (Sato *et al.*, 2010). Cependant, le rendement en spermatozoïdes produits *in vitro* reste faible (Dumont *et al.*, 2015). Des données plus récentes ont montré que la progression méiotique et post-méiotique pourrait être altérée (Dumont *et al.*, 2016).

Il existe des lipides naturels, les cannabinoïdes endogènes (ou endocannabinoïdes), qui servent de modulateurs de la spermatogénèse (Grimaldi *et al.*, 2013) et de la reproduction (Du Plessis *et al.*, 2015). Ces endocannabinoïdes sont capables de se lier et d'activer les récepteurs aux cannabinoïdes de type 1 (CB₁) au niveau du cerveau et de type 2 (CB₂) au niveau du testicule (Li *et al.*, 2018) (Figures 4 et 5) qui miment certains effets du Δ^9 -tétrahydrocannabinol (THC), le composant psychoactif du Cannabis sativa (Sugiura *et al.*, 2002).

Les cellules germinales mâles mitotiques (spermatogonies) et méiotiques (spermatocytes) possèdent un

2

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



système endocannabinoïde complet et actif qui est modulé au cours de la spermatogenèse. Il a été proposé que le CB₂ joue un rôle important dans l'entrée en méiose des cellules germinales mâles postnatales (Grimaldi *et al.*, 2009). Un composé chimique (le JWH133) mimant l'action d'endocannabinoïdes a donc été

ajouté pour activer les récepteurs CB₂ afin d'augmenter l'entrée en différenciation des cellules 'souches' durant la première phase de la spermatogenèse *in vitro* chez la souris. Le but de cette étude n'est donc pas d'évaluer la toxicité introduite par la toxine THC mais de se focaliser sur les actions bénéfiques de l'activation du récepteur CB₂ au sur les cellules germinales.

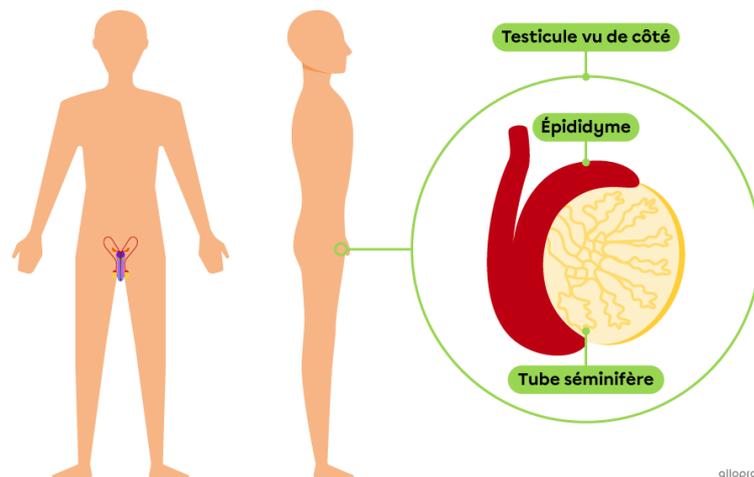


Figure 1 : Origine de la spermatogenèse. Les gamètes mâles, les spermatozoïdes, sont produits dans les tubes séminifères des testicules qui sont situés dans la gonade mâle : le testicule. Référence : <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-spermatogenese-s1301>

Les étapes de la spermatogenèse

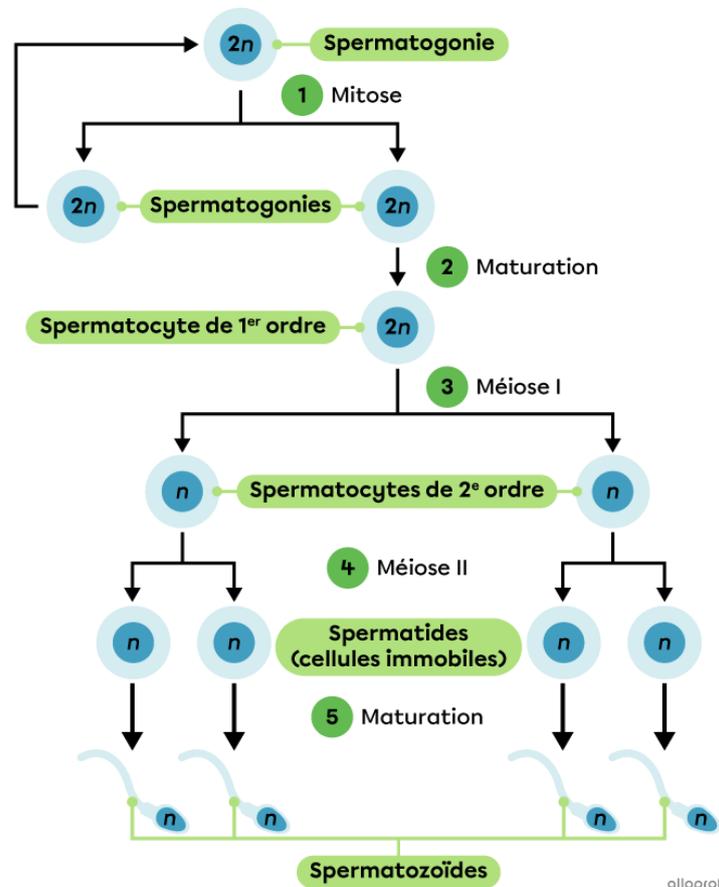


Figure 2 : Les étapes de la spermatogenèse. La spermatogenèse est le processus de production de gamètes mâles, appelés spermatozoïdes. Avant la naissance, des gamètes immatures sont produits, les spermatogonies. De la naissance à la puberté, les mitoses (processus qui conduit une cellule mère à se diviser en deux cellules « filles » génétiquement identiques. Ce mécanisme naturel est l'étape finale du cycle cellulaire.) augmentent le nombre de spermatogonies. A la puberté, la moitié des spermatogonies devient spermatoocytes de premier ordre ($2n$), $2n$ signifiant « 2 lots de n chromosomes ». Ces cellules sont diploïdes ($2n$ chromosome), c'est-à-dire qu'elles possèdent deux exemplaires équivalents (ou homologues) de chaque chromosome. La méiose I produit deux spermatoocytes de deuxième ordre (n), n signifie « 1 seul lot de n chromosomes ». Ces cellules sont haploïdes (cellule à n chromosomes), c'est-à-dire ne possédant qu'un exemplaire de chaque chromosome. A la méiose II, chaque spermatoocyte de deuxième ordre donne deux spermatoïdes. Après maturation, elles deviennent des spermatozoïdes avec tête, pièce intermédiaire et queue. Initialement immobiles, les spermatozoïdes acquièrent leur mobilité en migrant des tubes séminifères vers l'épididyme. Plus de 400 millions sont produits quotidiennement. Dans cette étude, « n » est parfois noté « C » lorsqu'il s'agit d'évaluer la quantité de matériel chromosomique contenu dans une cellule. Référence : <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-spermatogenese-s1301>

4

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

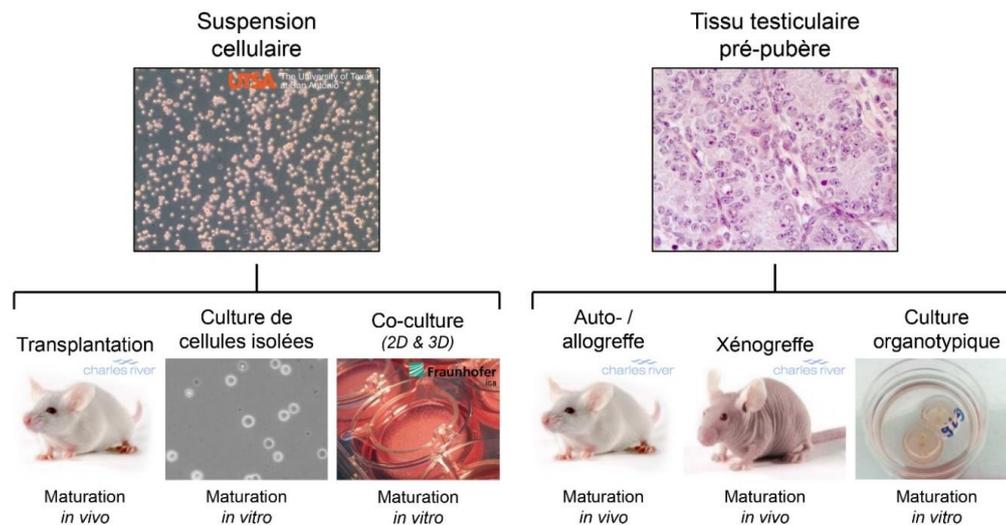


Figure 3 : Stratégies de restauration de la fertilité à partir d'une suspension de cellules germinales immatures ou des fragments de tissu testiculaire. En biologie, une transplantation consiste à injecter des cellules dans un organisme sans qu'il n'y ait forcément de vascularisation ; à l'inverse une greffe est un transfert de cellules, de tissus ou d'organe prélevé soit sur le malade lui-même ou sur un donneur impliquant fatalement une vascularisation. Afin de restaurer la fertilité, il est possible d'utiliser des cellules que l'on isole puis, que l'on transplante ou que l'on cultive dans différents supports. Cette culture peut se faire in vivo avec une transplantation au sein d'une espèce vivante ou se faire in vitro à travers une maturation isolée ou en coculture avec d'autres cellules. Il est aussi possible d'utiliser des tissus ou des parties de tissus que l'on transplante ou cultive dans différents supports comme pour l'isolation cellulaire. Une allogreffe ou une xénogreffe peut être effectuée sur un être vivant pour restaurer sa fertilité. Lors de l'allogreffe de cellules souches, on prélève des cellules souches chez une personne (donneur) puis on les administre (receveur). Tandis qu'une xénogreffe ou hétérogreffe, est une transplantation d'un organe, d'un tissu ou de cellules d'un donneur à un receveur d'une espèce différente. Cultiver de manière in vitro à travers l'utilisation d'une culture organotypique est une autre solution envisageable. C'est cette dernière qui a été employé durant cette étude sur le modèle souris. D'après Dumont (2016).

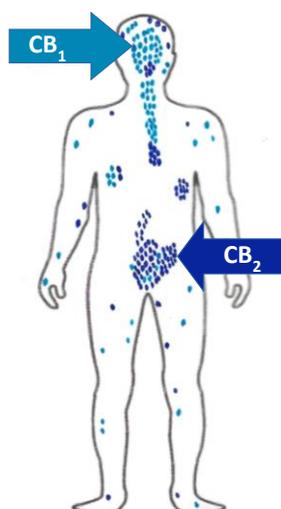


Figure 4 : Schéma illustrant la présence et la concentration des récepteurs CB₁ et CB₂ dans le corps humain, majorité du CB₂ au niveau testiculaire. Les récepteurs CB₁, sont des récepteurs couplés aux protéines G (familles de protéines à sept domaines transmembranaires). On les trouve en quantités très élevées dans le système nerveux (central et périphérique). Les récepteurs CB₂ se localisent au niveau des différentes parties du système immunitaire, le foie, le placenta et le système nerveux ainsi que dans les organes reproducteurs mâles (testicules).
Référence : <https://www.norml.fr/sante-prevention-rdr/le-systeme-endocannabinoides/>

Les cannabinoïdes se lient aux récepteurs aux cannabinoïdes

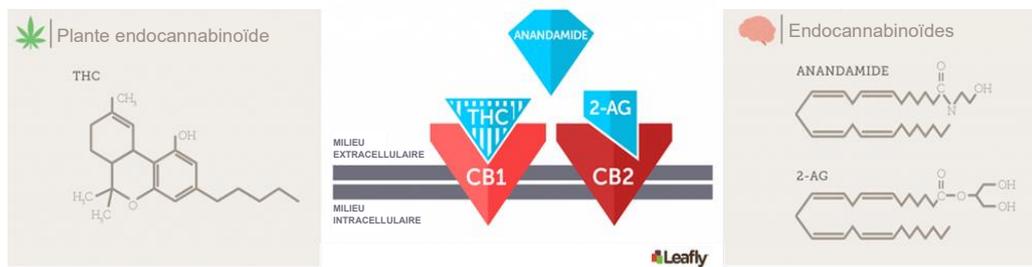


Figure 5 : Récepteurs aux cannabinoïdes CB_1 et CB_2 . Le Δ^9 -tétrahydrocannabinol (THC) est apportée par la consommation de cannabis. Il possède des propriétés psychoactives et est très nocif sur le testicule. Les endocannabinoïdes tels que la 2-arachidonoylglycérol (2-AG) et la N-arachidonoyléthanolamine (anandamide, AEA) ont un rôle bénéfique pour un système reproductif sain et fertile. Tous les « cannabinoïdes » n'ont donc pas le même effet. Le THC se fixe spécifiquement sur le récepteur CB_1 et le 2-AG sur le récepteur CB_2 . Référence : Dell et al. (2021) avec la permission de www.leafly.com/news/science-tech/what-is-the-endocannabinoid-system

II Matériels et Méthodes

1 Approbation éthique

Le comité de protection et d'utilisation d'animaux de l'Université de Rouen a approuvé toutes les procédures expérimentales réalisées dans cette étude, selon la règle des 3R (Remplacer l'expérimentation animale si possible, et à défaut, Réduire le nombre d'animaux utilisés et Raffiner les procédures).

2 Culture *in vitro* et contrôles *in vivo*

Afin d'évaluer l'impact de l'activation de CB_2 au cours de la première vague de la spermatogenèse, des cultures *in vitro* sont effectuées à partir de tissus testiculaires prépubères. Les contrôles *in vivo* (témoins) ont été faits (Figure 6) en utilisant des testicules de souris (aux âges correspondants aux étapes de la spermatogénèse). En se référant aux différents stades de la spermatogénèse, des temps ont été sélectionnés car des stades

spécifiques des cellules germinales étaient présents.

3 Analyses morphologiques

De fines sections de tissus testiculaires et d'explants ont été montées sur des lame de Polysine et ont été colorées (i) avec l'hématoxyline éosine safran (HES) pour l'appréciation de la morphologie testiculaire et (ii) avec la réaction de Periodic acid-Schiff (PAS) pour la détection de l'acrosome, caractéristique des spermatozoïdes ronds.

4 Immunomarquages

L'immunofluorescence et l'immunohistochimie (Figure 7, Tableau 1) sont basés sur une réaction antigène-anticorps. Ces méthodes sont employées afin de détecter des antigènes ou des anticorps. Quand on souhaite repérer des antigènes, il est nécessaire d'avoir des anticorps spécifiques correspondant à la spécificité antigénique recherchée. Il s'agit de sérums polyclonaux préparés chez l'animal, d'immunoglobulines purifiées ou, plus souvent,

d'anticorps monoclonaux. Dans cette étude, suite à la fixation d'un anticorps sur l'antigène d'intérêt, il a été possible de le

visualiser avec le chromogène le 3,3'-Diaminobenzidine (DAB) formant une coloration marron.

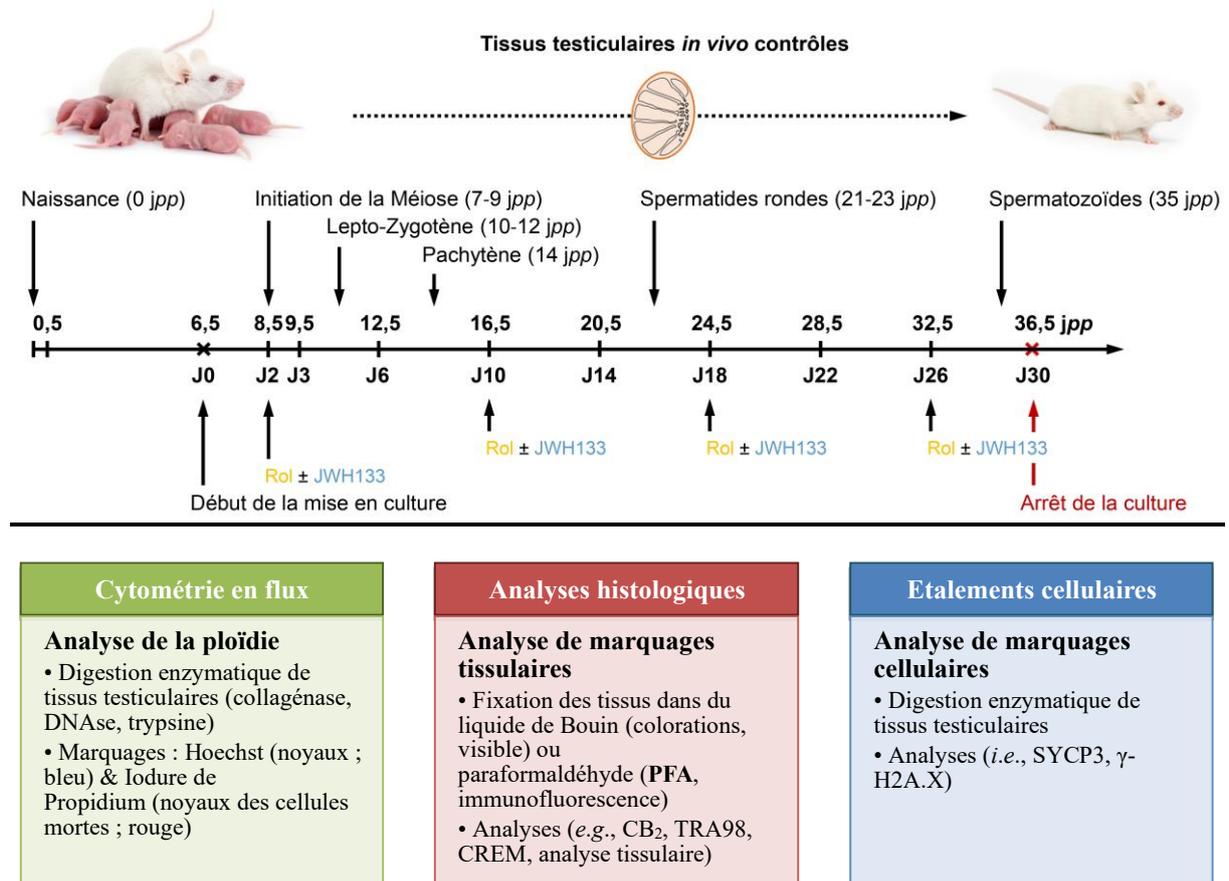


Figure 6: Organigramme de conception de l'étude. Des tissus prépubères sont mis en culture *in vitro*. D'autres sont utilisés comme contrôles *in vivo* aux âges correspondants. Diverses analyses tels que la cytométrie en flux pour étudier la ploïdie (le nombre de « n » des noyaux) par cytométrie en flux, des analyses histologiques des tissus et des étalements cellulaires sont effectuées afin de caractériser l'aspect du tissu testiculaire et des cellules. D'après Dumont et al., 2020.

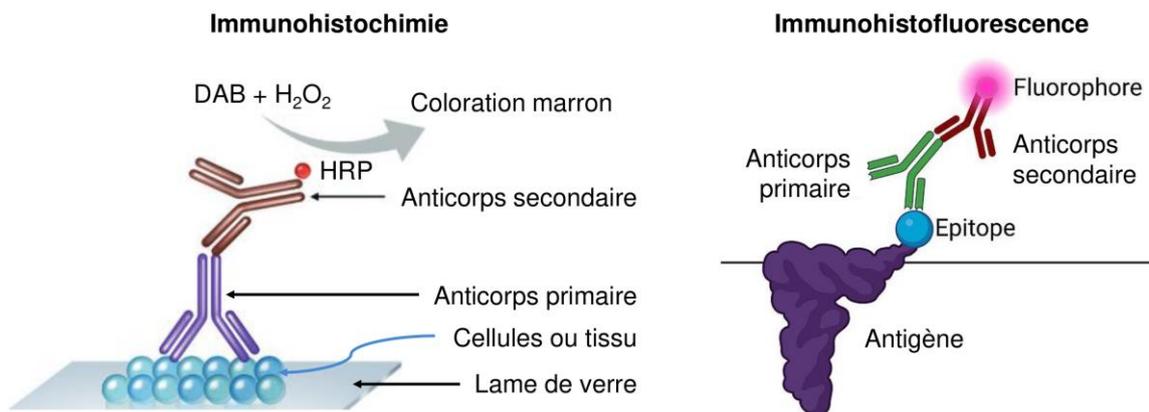


Figure 7 : Principe des techniques d'immunomarquage. Le principe de l'immunohistochimie repose sur la reconnaissance d'un antigène par un anticorps spécifique et la révélation de ce complexe antigène-anticorps par une réaction chimique grâce à une enzyme et son substrat. Un anticorps connu qui dirigé contre un antigène recherché est utilisé sur la préparation histologique. Une mise en évidence est ensuite effectuée sur la fixation éventuelle de l'anticorps par un chromogène (comme le DAB) responsable d'une couleur particulière (marron). De manière générale, l'enzyme est la Horse Radish Peroxidase (HRP) ou la phosphatase alcaline. Ainsi, l'immunohistochimie consiste à détecter directement dans les tissus le site de liaison d'un anticorps spécifique avec la protéine contre laquelle il est dirigé. Dans le cas de l'immunofluorescence, le principe reste le même. Les antigènes ou anticorps sont cependant détectés grâce à des anticorps couplés à un fluorochrome. Les deux techniques ont été employées dans cette étude. Références : d'après Kim S.W. et al. (2016) et <https://fr.wikipedia.org/wiki/Immunofluorescence>

Tableau 1 : Anticorps utilisés au cours de l'étude. Estimation de différents stades de différenciation des cellules germinales par immunomarquage des sections de tissus (gauche). Évaluation de l'expression de CB₂ dans les tubes séminifères par immunofluorescence (droite).

Immunohistochimie		Immunofluorescence	
Anticorps utilisés	Anticorps de rat <i>Anti-TRA98</i>	Anticorps de lapin <i>Anti-CREM</i>	Anticorps de lapin <i>Anti- CB₂</i>
Identification	Spermatogonie, Spermatocytes I Leptotène, Zygotène, Pachytène (stade précoce)	Spermatocyte Pachytène (stade tardif), Spermatide ronde	Présence de CB ₂

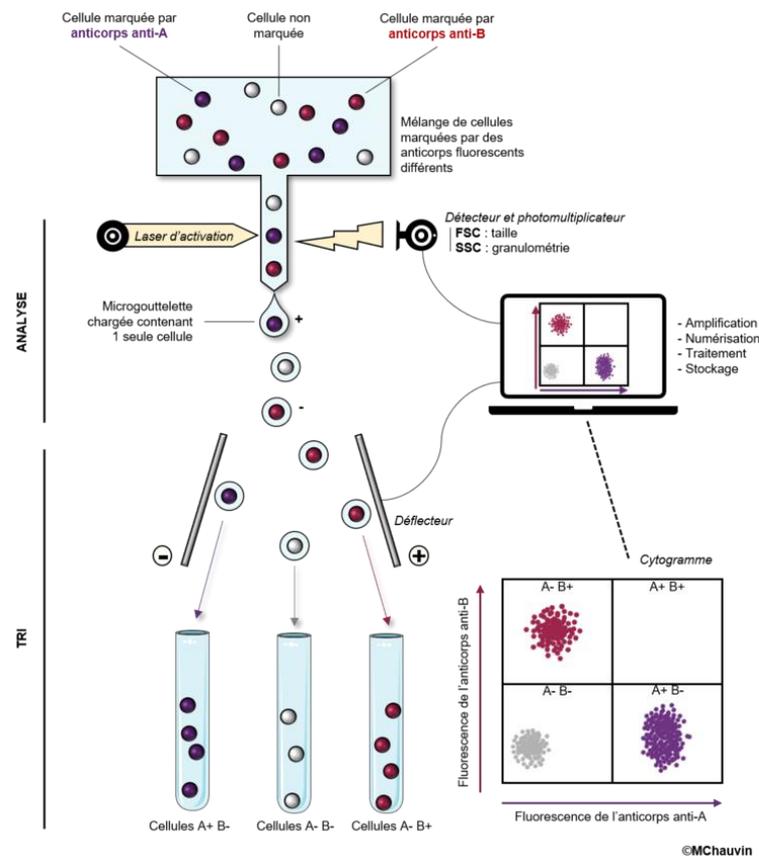


Figure 8 : Principe du tri cellulaire activé par fluorescence (Fluorescence Activated Cell Sorting, FACS). La cytométrie en flux est un processus technologique qui utilise un ou plusieurs lasers afin de faire une analyse sur des cellules individuelles. Elle permet entre autres d'étudier le cycle cellulaire, d'analyser la viabilité et la vitalité de cellules ainsi que l'apoptose sur une lignée cellulaire. Les applications de la cytométrie en flux concernent des domaines variés comme la biologie moléculaire et cellulaire, la cancérologie, l'immunologie, la pharmacologie. Référence : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cytométrie_en_flux (Manon Chauvin).

5 Cytométrie en flux.

La technique de cytométrie en flux (Figure 8) permet une évaluation de la ploïdie des cellules en évaluant la quantité d'ADN dans chaque noyau : 4C : différents stades de spermatocyte I et spermatogonies G2 ; 2C : spermatogonies G1 et spermatocyte II ; 1C : spermatide allongée et spermatide ronde et 1C* : spermatozoïde et spermatide allongé.

6 Évaluation de l'étalement des cellules testiculaires.

Un marquage de la protéine 3 du complexe synaptonémal (SYCP3) (Figure 9) a été effectué afin d'identifier les éléments axiaux chromosomiques présents à la prophase I de la méiose. De même pour détecter les régions chromosomiques non synaptiques, le marquage de l'histone H2A.X phosphorylée (γ -H2A.X) a été effectué. L'ADN contenu dans le noyau des cellules a été marqué avec au DAPI.

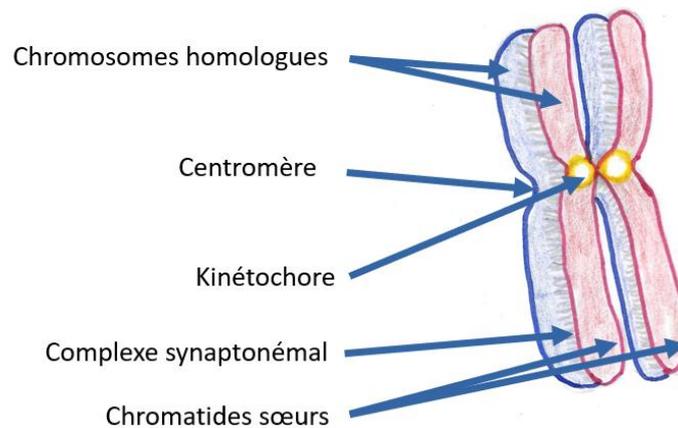


Figure 9 : Schéma présentant un complexe synaptonémal. Au début de la prophase I, les chromosomes homologues se réunissent pour former une synapse. Les chromosomes sont étroitement liés entre eux parfaitement alignés par un réseau protéique appelé complexe synaptonémal et par des protéines de cohés situées au centromère. D'après "OpenStax Anatomy and Physiology", Version 8.25 from the Textbook, 201.

III Résultats et Discussion

1 Une concentration de 1 μ M de JWH133 permet une meilleure différenciation in vitro des cellules germinales testiculaires prépubertaires

Une première série de cultures d'explants testiculaires de souris de 6,5 jours *post-partum* (*jpp*) a été réalisée afin d'évaluer l'impact d'une gamme de supplémentation en JWH133 (10 nM, 100 nM, 1 μ M, 10 μ M). La concentration de 1 μ M de JWH133 a été trouvée comme étant celle qui réduit la zone nécrotique centrale à 30 jours (J30) et favorise un nombre plus élevé de cellules CREM-positives par zone de tissu sain. Ces données sont cohérentes avec d'autres études de la littérature scientifique qui ont évalué l'impact de JWH133 sur la culture de cellules isolées avec une concentration

optimale de 1 μ M.

2 CB₂ est exprimé dans les tissus testiculaires cultivés in vitro pendant l'initiation de la méiose de la première vague de la spermatogénèse

CB₂ est exprimé au niveau de la membrane plasmique des cellules intratubulaires dans un nombre réduit de tubes séminifères à 6,5 *jpp* (Figure 10 A₁-C₁). Les tubes séminifères avec une forte expression de CB₂ apparaissent à J3 (Figure 10 A₃-C₃). Le pourcentage de tubes séminifères avec une expression de CB₂ est plus élevé à J3 (13,8 \pm 1,28%) après 24 h de supplémentation avec JWH133 initiée à J2, confirmant une expression de CB₂ *in vitro*. Ces résultats sont en accord avec les observations faites par une autre équipe sur des cultures de cellules murines isolées obtenues à partir de tissus testiculaires de souris de 6,5 *jpp* et cultivées pendant 24 h.

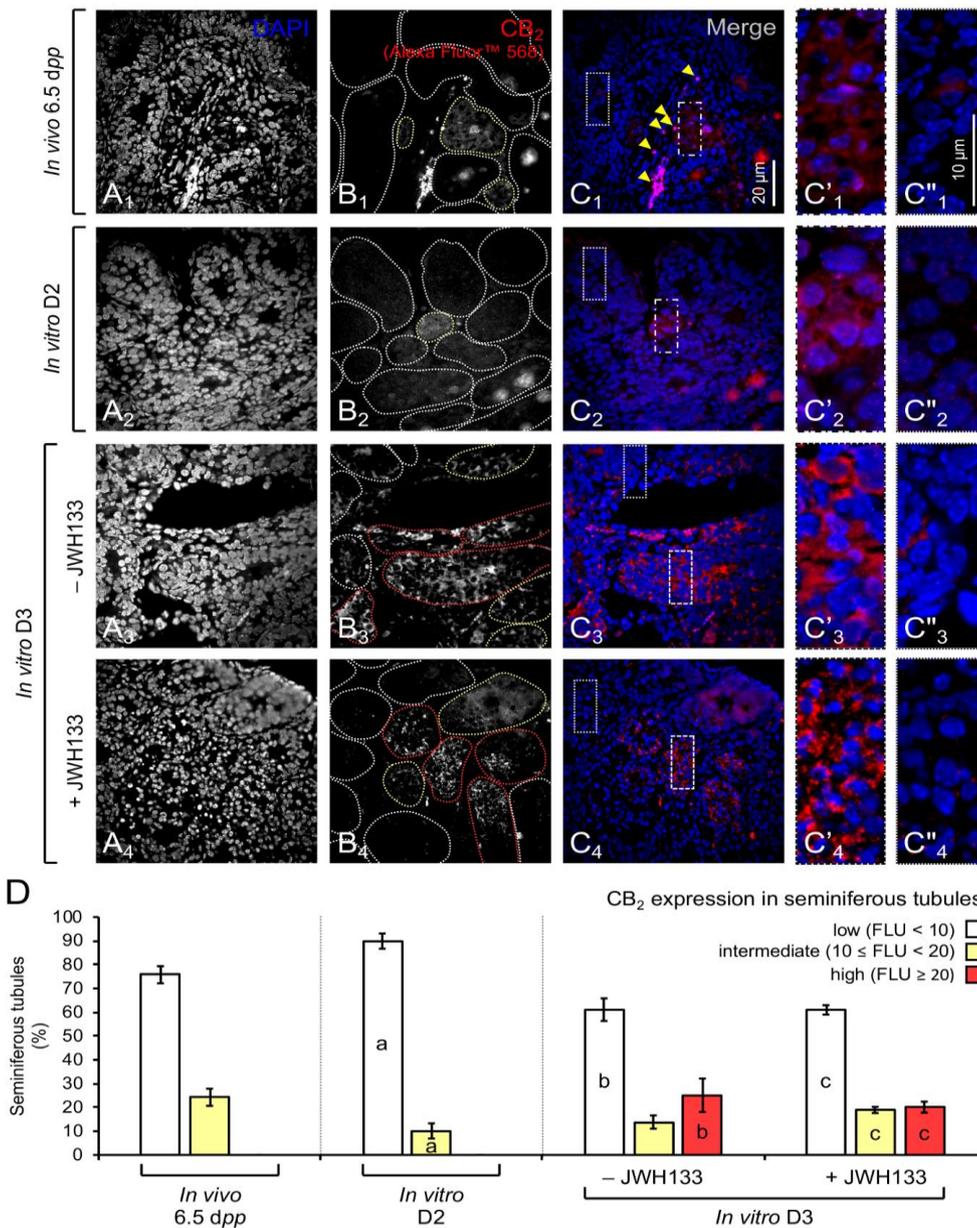


Figure 10 : Immunofluorescence de CB₂. La présence de CB₂ (signal rouge) a été évaluée dans des tissus testiculaires et des explants. L'ADN des noyaux est marqué au DAPI (signal bleu). Des images en fluorescence ont été obtenues pour des tissus testiculaires in vivo à 6,5 jpp (A₁, B₁ et C₁) et des explants testiculaires in vitro à J3 avec (A₄, B₄ et C₄) ou sans (A₃, B₃ et C₃) supplémentation en JWH133. Les tubes séminifères présentant un niveau d'expression de CB₂ faible (en blanc), intermédiaire (en jaune) et élevé (en rouge) sont délimités par des cercles en pointillés. D'après Dumont et al. (2020).

3 La ploïdie des cellules issues du tissu testiculaire est modifiée *in vitro* par la supplémentation en JWH133.

On peut observer une discrète entrée en méiose des spermatogonies pour les explants testiculaires cultivés *in vitro*. A la fin de la culture à J30, la proportion de cellules évaluées comme étant des cellules haploïdes post-méiotiques (représentant 1C* + 1C) obtenues après une supplémentation avec JWH133 ($12,2 \pm 1,61\%$) est plus élevée que sans supplémentation ($6,30 \pm 1,16\%$, $P = 0,0286$) (Figure 11).

4 La supplémentation en JWH133 permet une meilleure différenciation des cellules germinales testiculaires de testicules prépubères cultivés *in vitro*.

Le développement progressif des

cellules germinales à des moments clés de la spermatogenèse (Figure 12) a été évalué tout au long de (i) la culture *in vitro* (jour 2 [D2], J3, J6, J10, J18, et J30) couplée à (ii) des contrôles *in vivo* (8, 9, 12, 16, 25, et 36 *jpp*). Aucune formation de nécrose n'a été observée pour les tissus testiculaires témoins *in vivo*. Pour les cultures *in vitro*, une importante zone nécrotique a été détectée après environ une semaine de culture. Vers la fin de la culture, une réduction de la zone nécrotique est observée pour la condition utilisant une supplémentation de $1 \mu\text{M}$ de JWH133 ($27,5 \pm 1,07\%$) par rapport aux explants cultivés sans supplémentation ($45,8 \pm 2,83 \%$, $P = 0,0043$). De plus, lorsque l'ajout de JWH133 permet une augmentation du nombre de cellules CREM-positives (cellules germinales post-méiotiques).

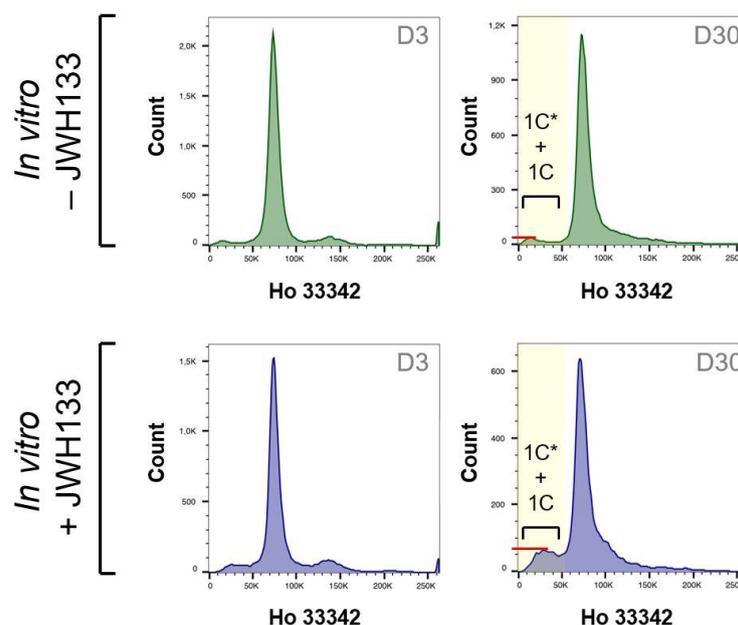


Figure 11 : Évaluation de la supplémentation en JWH133 sur des explants testiculaires au long d'une culture organotypique *in vitro* de 30 jours. Teneur en ADN des explants testiculaires *in vitro* avec ou sans supplémentation avec JWH133. C, quantité d'ADN (correspondant au nombre de chromosomes) ; Ho 33342, Hoechst 33342 (marquant l'ADN). D'après Dumont et al. (2020).

12

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

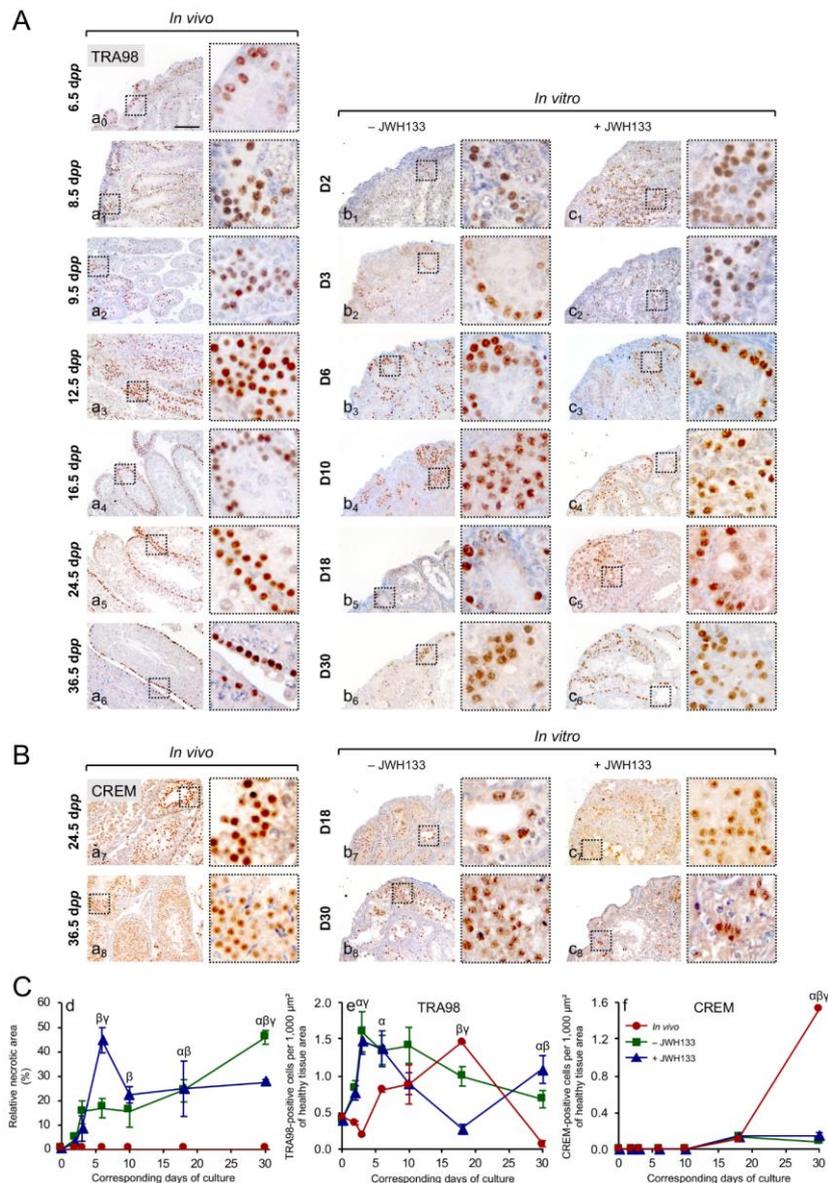


Figure 12 : Évaluation de la supplémentation en JWH133 sur des explants testiculaires de souris tout au long d'une culture d'organe in vitro de 30 jours. Analyse histologique de tissus testiculaires in vivo (a_{0-8}) et explants testiculaires obtenus par culture in vitro de 30 jours avec (+ JWH133 ; c_{1-8}) ou sans (- JWH133 ; b_{1-8}) la supplémentation en JWH133 à 1 μ M. Une évaluation de la densité des cellules germinales a été effectuée à l'aide du TRA98, notamment en début de culture (J2 ; b_1 et c_1 et J3 ; b_2 et c_2) et à l'aide du CREM en fin de culture (J18 ; b_7 et c_7 et J30 ; b_8 et c_8). Des testicules d'âges correspondants ont été utilisés comme contrôles in vivo. Les cellules positives ont été colorées en brun par le chromogène DAB et une contre-coloration bleue a été obtenue avec de l'hématoxyline. D'après Dumont et al. (2020).

13

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

5 La culture organotypique maintient la progression de la méiose des cellules germinales.

En culture *in vivo*, l'entrée en méiose est corrélée à l'expression de la protéine SYCP3 du complexe synaptonémal qui est localisée le long de la chromatine condensée du spermatocyte I zygotène au pachytène. La protéine γ -H2A.X, présente

dans les cassures doubles brins de l'ADN, est légèrement visible des spermatogonies au spermatocyte I pachytène au niveau de la vésicule sexuelle (corps XY) (Figure 13). Une spermatogenèse complète a été obtenue *in vitro*, avec une augmentation du pourcentage de spermatocyte zygotènes après activation de CB₂ par 1 μ M de JWH133.

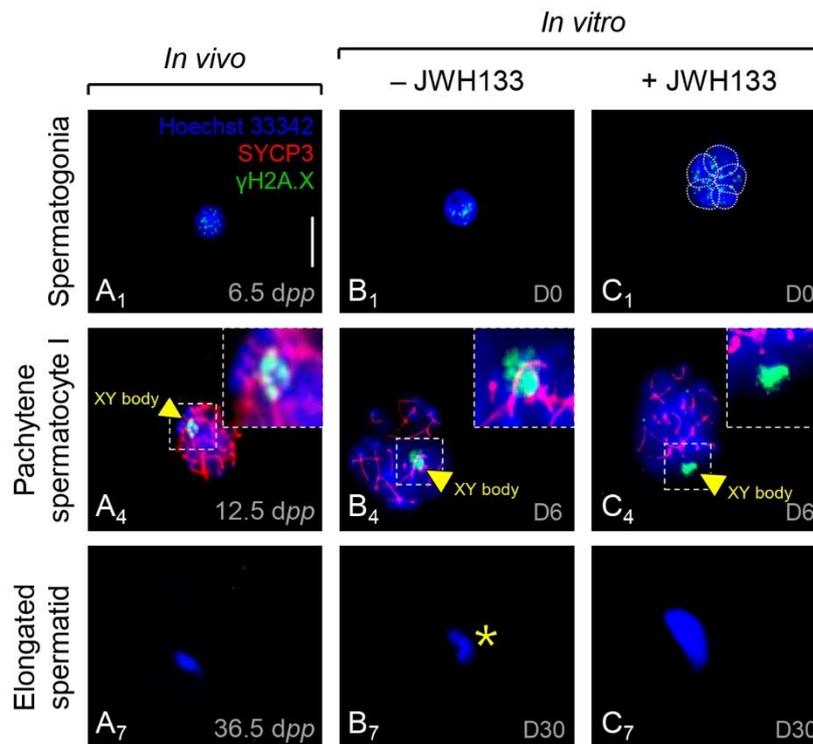


Figure 13 : Analyse en immunofluorescence de la progression de la spermatogenèse *in vivo* et *in vitro* de souris. Les noyaux étalés ont été doublement marqués avec le SYCP3 (signal rouge) et le γ -H2A.X (signal vert) et contre-colorés avec Hoechst 33342 (signal bleu). D'après Dumont et al. (2020).

IV Conclusion

Après 30 jours de culture *in vitro* en interface gaz-liquide :

i. un enrichissement des cellules germinales haploïdes a été détecté par cytométrie en flux ;

ii. une réduction de la zone nécrotique (engendrée par une hypoxie au centre de l'explant testiculaire) a été observée ;

iii. une augmentation de la densité des cellules germinales post-méiotiques a été observée.



Cette étude montre une spermatogénèse complète *in vitro* observée après 30 jours de culture organotypique d'explants tissulaires de souris prépubères. Cette étude définit le rôle majeur des endocannabinoïdes et du récepteur de cannabinoïdes de type 2 pour le développement des cellules germinales pendant la première vague spermatogène

chez la souris. La pertinence clinique potentielle de ces observations est que l'administration d'agonistes à base de cannabinoïdes pourrait stimuler la spermatogénèse *in vitro*.

Il a été montré que l'activation de CB₂ améliore *in vitro* l'entrée en méiose et la différenciation des spermatogonies, mimant ainsi la transition méiotique physiologique.

LEXIQUE :

Agoniste : Il s'agit d'une molécule qui se lie à un récepteur membranaire et l'active. Il imite souvent le messager naturel qui se lie habituellement au récepteur.

Anticorps : Protéine de défense produite par l'organisme en présence d'un antigène dont elle neutralise l'effet toxique. L'anticorps sera spécifique à un antigène donné pour lequel il reconnaîtra une partie spécifique appelée épitope ou déterminant antigénique. Cette spécificité antigène-anticorps est utilisée dans les techniques d'immunomarquage.

Apoptose : Processus physiologique de mort cellulaire programmée.

Cellules CREM-positives : Marquage spécifique obtenu à partir d'un anticorps détectant spécifiquement la protéine CREM : permet de faciliter la détection des cellules germinales post-méiotiques.

Culture *in vitro* / Culture *in vivo* : Le terme « *in vivo* » fait référence à une expérience qui utilise un organisme vivant entier, plutôt qu'un organisme mort. Les essais cliniques et l'expérimentation animale sont deux types de recherche. Les tests *in vivo* ont été privilégiés par rapport aux tests *in vitro* car ils sont mieux adaptés à l'observation des effets globaux quand il s'agit d'une expérience sur un sujet vivant. *In vitro* (du latin « sous verre ») : en milieu artificiel, en laboratoire.

Culture organotypique : C'est une méthode consistant à prélever un organe sur un organisme et à le cultiver tout en préservant la structure de l'organe et la plupart des interactions cellulaires.

Cytométrie : La mesure caractéristique des cellules.

Explant : Fragment de tissu mis en culture.

Fixation : Étape en histologie destinée à immobiliser les structures cellulaires et tissulaires, de façon à les représenter le plus vivant possible.

Gonadotoxicité : L'effet néfaste d'un traitement anticancer sur la fertilité est appelé "gonadotoxicité". Cette appellation est issue de la fusion des mots « gonade » (organes de reproduction) et « toxicité » (nocivité).

Hoechst 33342 : Marqueur fluorescent utilisé pour marquer l'ADN.





Jour post-partum (latin) (jpp) : Jour après l'accouchement. Équivalent en anglais *day post-partum (dpp)*.

Leptotène : Se dit du premier stade de la prophase (méiose I), où les chromosomes se présentent sous la forme de longs filaments grêles.

Pachytène : Troisième stade de la prophase de la première mitose réductionnelle, caractérisé par le raccourcissement et l'épaississement des chromosomes.

Paraformaldéhyde : Forme polymérique solide amorphe blanche de forme formaldéhyde. Le paraformaldéhyde est dépolymérisé en formaldéhyde. Celui-ci peut être utilisé en dentisterie comme fumigant, dans le domaine agricole comme fongicide, bactéricide et en culture cellulaire comme fixateur (ce qui est le cas dans cet article : il va servir à fixer les tissus pour éviter qu'ils ne pourrissent).

Ploïdie : Nombre de garnitures chromosomiques simples d'une cellule ou d'un individu, exprimé par le symbole C (comme dans cette article) ou N.

Prolifération : Fait proliférer (se multiplier en se reproduisant).

Solution de Bouin : Le liquide de Bouin est composé d'acide picrique, de formaldéhyde et d'acide acétique. Le liquide de Bouin sert à fixer des tissus.

Spermatide : Cellule sexuelle mâle dont dérive le spermatozoïde.

Spermatocyte : Cellule germinale mâle qui devient une spermatide, puis un spermatozoïde.

Spermatogenèse : La spermatogenèse est le processus lors duquel un gamète mâle (spermatozoïde) est produit. Un gamète mâle passe par plusieurs stades de développement : la spermatogonie, le spermatocyte de premier ordre, le spermatocyte de deuxième ordre, la spermatide et, pour finir, le spermatozoïde. On part donc d'une spermatogonie diploïde, contenant l'information génétique en entier, pour obtenir 4 spermatozoïdes haploïdes.

Spermatogonies : Cellules germinales directement en contact avec la membrane basale du tube séminifère qui donnent naissance à des spermatocytes par des mitoses.

Spermiogénèse : Processus de différenciation progressive des spermatides en spermatozoïdes.

Tissu sain : Un tissu est un regroupement de nombreuses cellules qui possèdent toutes les mêmes caractéristiques. Ensemble, elles assurent une fonction au sein de l'organe auquel elles appartiennent.

Zone nécrotique : C'est une zone au niveau de laquelle, on distingue une mort accidentelle, pathologique des cellules appelée nécrose suite à une agression (une anoxie tissulaire par exemple).

Zygotène : Deuxième stade de la prophase de la méiose I, marqué par l'appariement côte à côte des chromosomes homologues sur toute leur longueur.





Références :

- Dell DD, Stein DP. Exploring the Use of Medical Marijuana for Supportive Care of Oncology Patients. *J Adv Pract Oncol*. 2021 Mar;12(2):188-201.
- Du Plessis SS, Agarwal A, Syriac A. Marijuana, phytocannabinoids, the endocannabinoid system, and male fertility. *J Assist Reprod Genet*. 2015;32(11):1575-1588. <https://doi.org/10.1007/s10815-015-0553-8>
- Dumont L, Arkoun B, Jumeau F, *et al*. Assessment of the optimal vitrification protocol for pre-pubertal mice testes leading to successful in vitro production of flagellated spermatozoa. *Andrology*. 2015;3(3):611-625. <https://doi.org/10.1111/andr.12042>
- Dumont L, Oblette A, Rondanino C, *et al*. Vitamin A prevents round spermatid nuclear damage and promotes the production of motile sperm during in vitro maturation of vitrified pre-pubertal mouse testicular tissue. *Mol Hum Reprod*. 2016;22(12):819-832. <https://doi.org/10.1093/molehr/gaw063>
- Dumont L. *Effets de la congélation et de la vitrification sur le tissu testiculaire pré-pubère murin : impact sur la différenciation in vitro des spermatogonies souches*, Thèse de doctorat en Biologie, sous la direction de Nathalie Rives, Rouen, École doctorale Normande de biologie intégrative, santé, environnement (Mont-Saint-Aignan, Seine-Maritime), 2016, 355 p.
- Dumont L, Rives-Feraille A, Delessard M, *et al*. Activation of the cannabinoid receptor type 2 by the agonist JWH133 promotes the first wave of in vitro spermatogenesis. *Andrology*. 2021 Mar;9(2):673-688.
- Grimaldi P, Di Giacomo D, Geremia R. The endocannabinoid system and spermatogenesis. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2013;4:192. <https://doi.org/10.3389/fendo.2013.00192>
- Grimaldi P, Orlando P, Di Siena S, *et al*. The endocannabinoid system and pivotal role of the CB2 receptor in mouse spermatogenesis. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2009;106(27):11131-11136. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812789106>
- Hou M, Andersson M, Eksborg S, Söder O, Jahnukainen K. Xenotransplantation of testicular tissue into nude mice can be used for detecting leukemic cell contamination. *Hum Reprod*. 2007;22(7):1899-1906. <https://doi.org/10.1093/humrep/dem085>
- Jahnukainen K, Mitchell RT, Stukenborg J-B. Testicular function and fertility preservation after treatment for haematological cancer. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes*. 2015;22(3):217-223. <https://doi.org/10.1097/MED.0000000000000156>
- Kim SW, Roh J, Park CS. Immunohistochemistry for Pathologists: Protocols, Pitfalls, and Tips. *J Pathol Transl Med*. 2016 Nov;50(6):411-418. <https://doi.org/10.4132/jptm.2016.08.08>
- Li X, Hua T, Vemuri K, *et al*. Crystal structure of the human cannabinoid receptor CB2. *Cell*. 2019;176(3):459-467.e13. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.12.011>
- Sato T, Katagiri K, Yokonishi T, *et al*. In vitro production of fertile sperm from murine spermatogonial stem cell lines. *Nat Commun*. 2011;2:472. <https://doi.org/10.1038/ncomm1478>





Sugiura T, Kobayashi Y, Oka S, Waku K. Biosynthesis and degradation of anandamide and 2-arachidonoylglycerol and their possible physiological significance. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*. 2002;66(2–3):173-192. <https://doi.org/10.1054/plef.2001.0356>

Wyns C, Curaba M, Vanabelle B, van Langendonck A, Donnez J. Options for fertility preservation in prepubertal boys. *Hum Reprod Update*. 2010;16(3):312-328. <https://doi.org/10.1093/humup/d/dmp054>

Zarandi NP, Galdon G, Kogan S, Atala A, Sadri-Ardekani H. Cryostorage of immature and mature human testis tissue to preserve spermatogonial stem cells (SSCs): a systematic review of current experiences toward clinical applications. *Stem Cells Cloning*. 2018;11:23-38. <https://doi.org/10.2147/SCCAA.S137873>

Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration le Dr. Ludovic Dumont, Ingénieur de Recherche (IGR, PhD) en Biologie de la Reproduction (par ordre alphabétique) : Bavart Noah, Boulet Ilona, Claux-Hardy Sarah, Deconinck Timéa, Destrebecq Louise, Genot Baptiste, Gramont Paul, Lebail Ninon, Maurice Flora, Minos Ludmilla, Pomorski Bastien, Rizzo Camille, Veyt Cloé.

Comment citer cet article : Ludovic Dumont et la 1^{ère}-Terminale du lycée Groupe Scolaire Sévigné (Compiègne, FR), *L'activation du récepteur aux cannabinoïdes de type 2 favorise la production de spermatozoïdes in vitro*, Journal DECODER, 2024-06-30.



Le milieu de vie aquatique des premiers tétrapodes : une histoire de delta ?



Jean Goedert¹ (chercheur) et la classe de 3^{ème} B du collège Aimé Césaire de Mme Magali Dubeau² et Mr Olivier Marié² : Afonso Fernandes Beatriz, Ait Ininou Delcourt Shayna, Alonso Elena, Azaïs Cameron, Chaoui Nada, Chochoy-Vandecrux Leo, Colas Myla, Cribier Enola, Cristos Victoria, De Commynes De Marsilly Juliette, Duizabo Léopold, Dupouy Aïnhua, Fu Lucas, Lacan Pablo, Lafourcade Lohan, Lahourcade Zoé, Langeveld-Orrell Tarquin, Lassalle Naïcia, Laterrade Martin, Le Page Mahina, Leveau Sacha, Marcadiou Alice, Poloni Lizenn, Ribaud Enzo, Vignola Chris, Yriarte Amaya, Zemour Fortuna Mei-Lin (*la liste des élèves est aussi mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article: Goedert, J., Lécuyer, C., Amiot, R., Arnaud-Godet, F., Wang, X., Cui, L., Cuny, G., Douay, G., Fourel, F., Panczer, G., Simon, L., Steyer, J.-S., and Zhu, M. (2018). Euryhaline ecology of early tetrapods revealed by stable isotopes. *Nature*, 558(7708), 68-72.

Institution : ¹ Muséum national d'Histoire naturelle, Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (CR2P), CNRS/MNHN/Sorbonne Université, CP 38, 57 rue Cuvier, F-75231 Paris cedex 05 (France)

² Collège Aimé Césaire de Saint-Geours-de-Marenne, 450 Avenue George Sand 40230 Saint Geours de Marenne

Résumé :

Les tétrapodes (vertébrés possédant 4 membres munis de doigts) sont apparus au Dévonien supérieur (il y a environ 375 Ma). Leurs membres ne leur permettaient pas de marcher en milieu terrestre, ils étaient encore inféodés aux environnements aquatiques. Depuis plus d'un siècle les scientifiques se posent la question si **les premiers tétrapodes et leur faune de vertébrés associée vivaient en milieu d'eau douce ou en milieu marin ?** Les analyses des sédiments qui contiennent ces fossiles ont permis de leur attribuer un milieu de vie aquatique d'eau douce.

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



Cependant, le milieu de fossilisation est parfois différent du milieu de vie. En effet, d'éventuels courants d'eau peuvent déplacer les corps des animaux après leur mort et ainsi conduire à une mauvaise interprétation du milieu de vie des premiers tétrapodes. L'étude d'éléments chimiques comme le soufre et l'oxygène contenus dans les os fossilisés de l'animal reflète leur alimentation et donc leur véritable milieu de vie ; l'analyse de la **composition isotopique stable**¹ du soufre et de l'oxygène des os a donc été utilisée dans cette étude afin de déterminer le milieu de vie des premiers tétrapodes. Nous démontrons ici que les milieux de vie aquatiques des premiers tétrapodes et de leur faune de vertébrés associée étaient à la fois soumis à une influence d'eau douce et d'eau salée et donc que ceux-ci ne vivaient pas exclusivement dans les milieux d'eau douce comme nous le pensions. Cette faculté d'adaptation a pu favoriser la survie de ce groupe lors de la crise biologique de la fin du Dévonien qui a provoqué la disparition d'au moins 70% des espèces.

Mots clés : isotope stable ; $\delta^{34}\text{S}$; $\delta^{18}\text{O}$; eau douce ; eau marine ; salinité de l'eau ; principe d'actualisme ; euryhalinité ; tétrapode ; Dévonien ; fossiles ; *Acanthostega* ; *Ichthyostega*

I Introduction

Les premiers tétrapodes - vertébrés à quatre membres munis de doigts - sont apparus à la fin du Dévonien, il y a environ 375 millions d'années (Ahlberg, 1995) comme le montre la découverte de squelettes fossilisés. Ils apparaissent peut-être même encore plus tôt, au milieu du Dévonien (il y a environ 395 millions d'années), comme le montre la découverte de pistes d'empreintes (Niedzwiedzki et al., 2010). Bien qu'ils possédaient des membres pourvus de doigts (Coates & Clack, 1990), l'étude détaillée de leur squelette révèle qu'ils étaient incapables de se mouvoir en milieu terrestre et qu'ils habitaient encore les milieux aquatiques (Clack et al., 2003; Coates & Clack, 1990; Pierce et al., 2012). Depuis plus de 100 ans une question suscite de nombreux débats au sein de la communauté paléontologique : **s'agit-il d'environnements aquatiques marins ou d'eau douce ?**

La méthode principale pour étudier les milieux de vie des espèces fossiles repose sur

l'analyse des sédiments qui les contiennent. Si les sédiments sont des sédiments déposés en milieu d'eau douce alors on émettra l'hypothèse que les organismes fossiles qu'ils contiennent vivaient en milieu d'eau douce ; et inversement pour les sédiments interprétés comme ayant été déposés en milieu marin, on émettra l'hypothèse que les organismes fossiles qu'ils contiennent vivaient en milieu marin. Toutefois, à leur mort, les organismes peuvent être plus ou moins transportés avant d'être enfouis dans des sédiments ; si bien que les sédiments qui les contiennent ne reflètent pas toujours leur milieu de vie.

Historiquement, la question de l'environnement de vie des premiers tétrapodes a donc été étroitement liée à l'interprétation environnementale d'un type de sédiments caractéristiques de la période de la fin du Dévonien appelés les Vieux Grès Rouge. Ces sédiments ont très tôt attiré l'attention des paléontologues, car ils contiennent une grande diversité de

¹ Les termes soulignés en gras et suivis d'un astérisque font l'objet d'une définition dans un lexique situé à la fin de l'article.





« poissons » fossiles (Agassiz, 1844; Woodward, 1889) ainsi que les premiers tétrapodes connus (Säve-Söderbergh, 1932). Historiquement, les sédiments des Vieux Grès Rouges ont été interprétés comme le produit de l'érosion d'une chaîne de montagnes (McClay et al., 1986) qui se seraient déposés dans des bassins continentaux et donc dans des environnements aquatiques d'eau douce (Godwin-Austen, 1855). Quinze ans avant que les paléontologues ne découvrent les restes fossilisés de ces premiers tétrapodes dans les sédiments des Vieux Grès Rouges le géologue américain Joseph Barrell avait émis l'hypothèse que ces animaux avaient dû habiter et évoluer dans les environnements d'eau douce représentés par les sédiments des Vieux Grès Rouges (Barrell, 1916).

Ainsi, lorsque les premiers tétrapodes *Ichthyostega* et *Acanthostega* ont été effectivement découverts dans les sédiments des Vieux Grès Rouges de l'Est du Groenland, la prédiction de Joseph Barrell a donné naissance à un **paradigme*** durable : les premiers tétrapodes et leur faune associée habitaient des environnements d'eau douce. Cependant, ce point de vue a été remis en question par de nombreux paléontologues, qui ont défendu l'idée que les sédiments des Vieux Grès Rouges ont pu être soumis à des influences marines plus importantes qu'on ne le pensait, et que les premiers tétrapodes ont pu tolérer des salinités plus élevées (Bray & Lawson, 1985; Carr & Jackson, 2008; Laurin & Soler-Gijón, 2010; Schmitz et al., 1991; Schultze & Cloutier, 1996). Depuis la découverte d'*Ichthyostega* et d'*Acanthostega*, d'autres fossiles de premiers tétrapodes (Ahlberg, 1995; Ahlberg et al., 1994; Campbell & Bell, 1977; Clack et al., 2012; Clément et al., 2004; Daeschler et al., 1994; Lebedev, 2004; LEBEDEV & CLACK, 1993; Shubin et al., 2004; Zhu et al., 2002) et des pistes d'empreintes (Niedzwiedzki et al.,

2010) ont été découverts dans le monde entier dans des dépôts sédimentaires reflétant des environnements marins, saumâtres ou d'eau douce (Blicek et al., 2007). Ces diverses interprétations ont relancé le débat sur les milieux de vie des premiers tétrapodes et de leur faune associée. Cependant, cette question n'est toujours pas résolue, en raison du manque de traceurs environnementaux directs qui pourraient aider à déchiffrer le milieu de vie des premiers tétrapodes.

D'un point de vue chimique on peut considérer les ossements fossilisés comme un mélange de matière acquise dans les tissus osseux lors de la vie de l'animal et de la matière secondairement acquise après la mort de l'animal, lors des processus de fossilisation (Trueman & Tuross, 2002). Les éléments chimiques incorporés dans les tissus osseux lors de la vie de l'animal proviennent majoritairement de leur alimentation et reflètent donc leur environnement de vie (Martin et al., 2017). Parmi ces éléments chimiques, le soufre et notamment sa composition isotopique stable (voir partie méthode) possède des valeurs très différentes entre les environnements marins et d'eau douce (Nehlich, 2015).

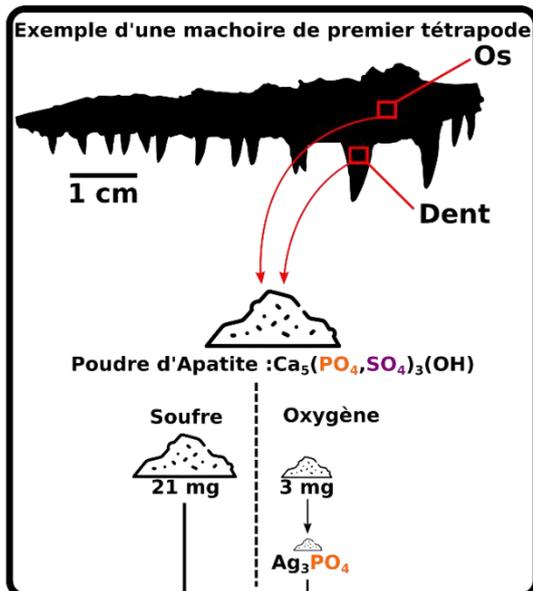
Nous utilisons dans cette étude la composition isotopique stable du soufre et de l'oxygène (qui permet également de différencier les environnements de vie aquatique) de l'os afin de tracer directement les environnements de vie des premiers tétrapodes (Figure 1). Dans un premier temps, nous démontrons que cette nouvelle méthode fonctionne sur des vertébrés actuels provenant de différents types d'environnements aquatiques. C'est le **principe d'actualisme***. Dans un second temps nous appliquons cette méthodologie à des restes fossilisés de premiers tétrapodes et leur faune associée de la fin du Dévonien provenant de deux régions géographiques (Figure 1.1) : l'Est du Groenland et la région



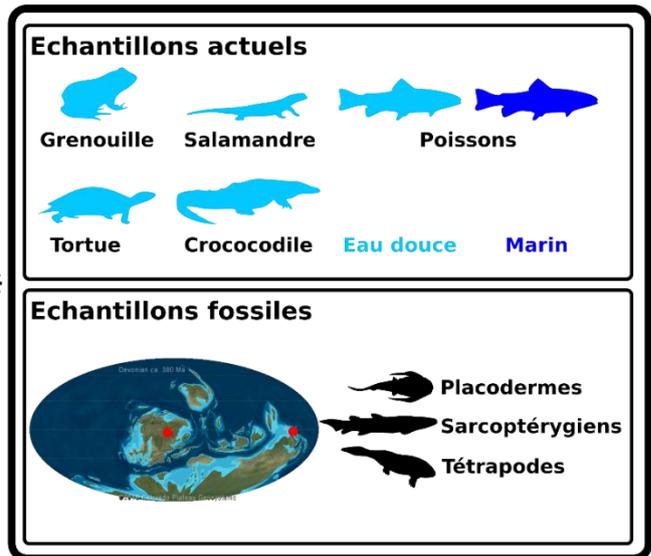
autonome chinoise de Ningxia Hui.

II Matériels et méthodes

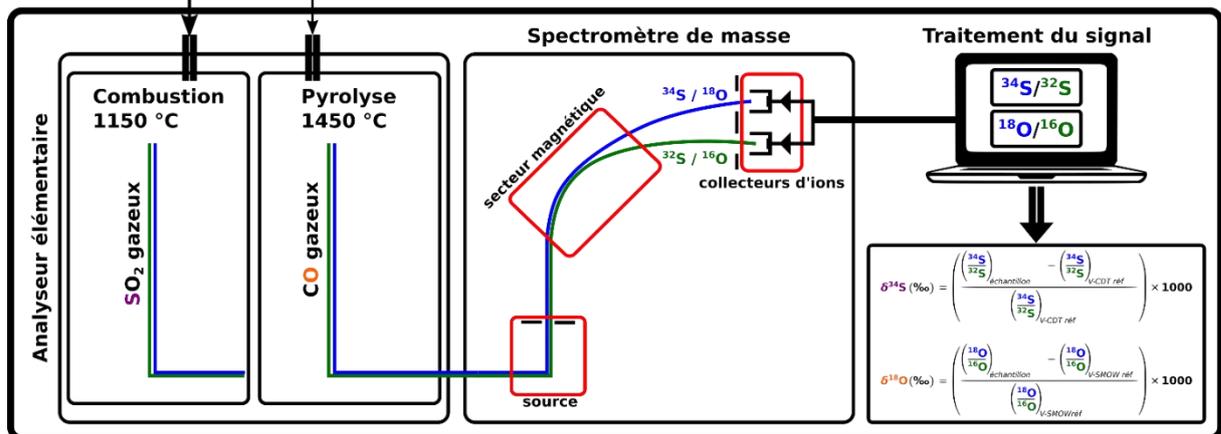
2-Echantillonnage



1-Collecte des échantillons



3-Analyses isotopiques



4-Cadre interprétatif - Environnements aquatiques actuels

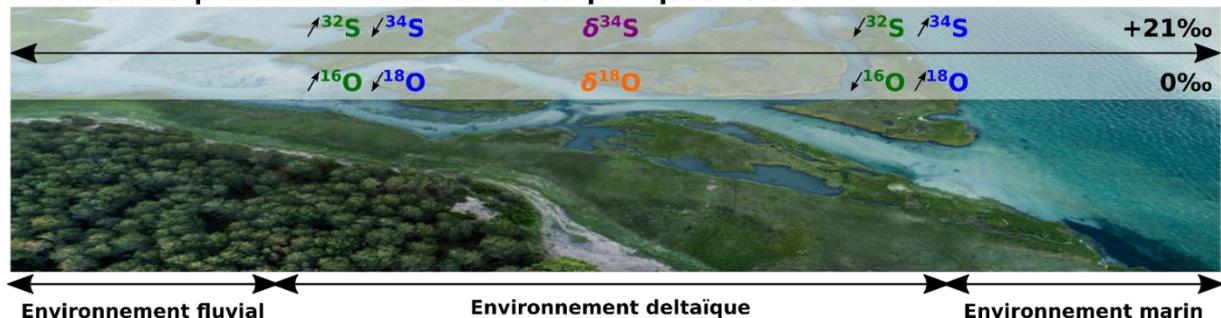


Figure 1. Représentation graphique de la méthodologie employée. 1. Des échantillons de



vertébrés actuels vivant dans des milieux d'eaux douces et marins ont été collectés. Des échantillons fossiles provenant de deux localités du Dévonien supérieur ont également été collectés. 2. Pour chaque échantillon, une quantité de poudre d'**apatite*** (la partie minéralisée des tissus squelettiques) est prélevée. 21 mg de poudre sont réservés à l'analyse isotopique du soufre et 3 mg à l'analyse isotopique de l'oxygène. Avant l'analyse isotopique de l'oxygène, les ions phosphates (PO_4^{3-}) de l'apatite sont extraits spécifiquement sous la forme de phosphate d'argent Ag_3PO_4 qui sert de support à l'analyse. 3. Les poudres sont ensuite introduites dans un analyseur élémentaire qui permet, via respectivement une combustion et une pyrolyse, de transformer le soufre de l'apatite et l'oxygène du phosphate d'argent sous la forme de dioxyde de soufre (SO_2) et de monoxyde de carbone (CO) gazeux. Ces gaz sont alors conduits vers la source d'un spectromètre de masse qui permet de les ioniser. Les ions sont ensuite conduits vers un secteur magnétique qui permet de les séparer en fonction de leur rapport masse sur charge. Ainsi, l'isotope lourd ($^{34}S/^{18}O$) est séparé de l'isotope léger ($^{32}S/^{16}O$) et tous deux sont collectés dans des cages de faraday dédiés. Le signal ionique est converti en signal électrique et traité par ordinateur pour calculer les rapports isotopiques $^{34}S/^{32}S$ et $^{18}O/^{16}O$ d'un échantillon. L'analyse isotopique d'échantillons de référence permet ensuite d'exprimer ces rapports isotopiques sous les formes conventionnelles de $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O$, exprimés en ‰ par rapport aux références internationales V-CDT et V-SMOW, respectivement. 4. Dans les environnements aquatiques actuels les environnements d'eau douce sont relativement appauvris en isotopes lourds (^{34}S , ^{18}O) et enrichis en isotopes légers (^{32}S , ^{16}O) par rapport aux environnements marins, et inversement. Les environnements marins actuels ont en général une valeur de $\delta^{34}S$ et de $\delta^{18}O$ proche de +21‰ et 0‰, respectivement.

Collecte des échantillons actuels. Les quatre tortues de Floride (*Trachemys scripta elegans* ; échantillons Tr-sc-1, Tr-sc-3-5) et les deux dents de crocodile du désert (*Crocodylus suchus* ; échantillons Cr-su-1 et Cr-su-2) ont été prélevés au zoo du Parc de la Tête-d'Or de Lyon, en France. L'eau a été échantillonnée directement dans les bassins dans lesquels ces animaux sont gardés. L'échantillon de salamandre tachetée (*Salamandra salamandra* ; échantillon Sal-sal-1) provient de la collection zoologique du Centre de Ressources pour les Sciences de l'Évolution (CERESE, FED 4271, Villeurbanne, France). L'eau a été échantillonnée à l'endroit d'où provient le spécimen (Bazas, Gironde, France). Les cinq grenouilles rieuses (*Pelophylax ridibundus* ; échantillons Pe-ri-1-5) ont toutes été prélevées dans un élevage à Pierrelatte (Drôme, France), ainsi que l'eau de

leur bassin et leur nourriture. Les quatre truites (*Oncorhynchus mykiss*, *Salvelinus fontinalis* et *Salmo trutta* ; échantillons On-my-2, On-my-3, Sa-fo-2 et Sa-tr-2) ont toutes été prélevées dans un élevage situé sur la commune d'Allons (Gironde, France), ainsi que l'eau de leur bassin et leur nourriture. Le silure glane (*Silurus glanis* ; échantillon Si-gl-1) et la carpe commune (*Cyprinus carpio* ; échantillon Cy-ca-1) ont été collectés dans un étang de la Dombes (Ain, France), exploité par la Maison Liatout. Les autres espèces de poissons (Sandre doré européen, *Sander lucioperca*, échantillon Sa-lu-1 ; Bar commun, *Dicentrarchus labrax*, échantillon Di-la-1 ; Sole commune, *Solea solea*, échantillon So-so-1 ; Limande commune, *Limanda limanda*, échantillon Li-li-1 ; Morue de l'Atlantique, *Gadus morhua*, échantillon Ga-mo-1 ; Saumon rouge, *Oncorhynchus nerka*,

5

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.





échantillon On-ne-1) ont toutes été collectées à la poissonnerie Maison Pupier à Lyon.

Collecte des échantillons fossiles. Les 40 échantillons de vertébrés du Dévonien du Groenland oriental ont été sélectionnés principalement à partir de spécimens non numérotés conservés dans la collection paléontologique du Musée d'histoire naturelle du Danemark, de l'Université de Copenhague. Ces échantillons ont été rapportés à l'occasion d'expéditions paléontologiques menées dans les années 1930-1950 par les paléontologues G. Säve-Söderbergh, E. Jarvik et G. Wängsjö. Les localités du Dévonien du Groenland oriental sont situées (du nord au sud) sur Gauss Halvø, Ymer Ø, Ella Ø, Traill Ø, Wegener Halvø et Canning Land⁵¹. Les restes de tétrapodes fossiles proviennent du groupe Celsius Bjerg du Dévonien supérieur, qui se compose principalement de siltstones et de grès. Ces sédiments ont été précédemment interprétés comme ayant été principalement déposés dans des conditions fluviatiles d'eau douce (Olsen & Larsen, 1993). Le groupe Celsius Bjerg se compose des formations sédimentaires Agda Dal, Elsa Dal, Aina Dal, Wimans Bjerg, Britta Dal, Stensiö Bjerg et Obrutschew Bjerg (Blom et al., 2007). Parmi ces formations, des restes de tétrapodes n'ont été rapportés que dans deux formations : les formations d'Aina Dal et de Britta Dal, qui forment - avec la formation moins fossilifère de Wimans Bjerg - ce que l'on appelle communément la "série à *Remigolepis*" (Blom et al., 2007). Nous avons donc sélectionné principalement des échantillons de la série à *Remigolepis* (34 échantillons sur 40, voir table 1). Deux échantillons fossiles proviennent de la "série à *Phyllolepis*", qui regroupe les formations d'Agda Dal et d'Elsa Dal et se situe, stratigraphiquement, immédiatement au-dessus de la série à *Remigolepis*. Trois échantillons fossiles proviennent de la "série à *Asterolepis*", qui est stratigraphiquement

inférieure aux séries à *Remigolepis* et à *Phyllolepis* (Blom et al., 2007). Sur la base d'une analyse des miospores, un âge Famennien a déjà été proposé pour les séries à *Remigolepis* et à *Phyllolepis* (Marshall et al., 1999). Les 11 échantillons de vertébrés du Dévonien provenant de la région autonome chinoise de Ningxia Hui ont été collectés à l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, en Chine. Ces échantillons proviennent de la formation de Zhongning (Pan et al., 1987), qui a livré les restes de *Sinostega pani* - qui est la première description d'un tétrapode dévonien d'Asie (Zhu et al., 2002). La formation de Zhongning se compose principalement de siltites, de grès quartzeux feldspathiques et de calcaires arénacés, qui ont tous été interprétés comme ayant été déposés dans des conditions non marines (Zhu et al., 2002). Sur la base d'une analyse des miospores, un âge Famennien a été proposé pour la formation de Zhongning (Crowson et al., 1991). Pour chaque spécimen, environ 100 mg de poudre d'os ont été prélevés à l'aide d'un foret à tête sphérique et diamantée.

Analyse du $\delta^{18}\text{O}_p$. Tous les échantillons d'apatite osseuse ont été traités selon un protocole de chimie humide précédemment décrit (Crowson et al., 1991), légèrement modifié par Lécuyer et al. (1993). Ce protocole consiste à isoler le phosphate (PO_4^{3-}) de l'apatite sous forme de cristaux de phosphate d'argent (Ag_3PO_4), en utilisant une dissolution acide et une résine échangeuse d'anions. Pour chaque échantillon, 20-30 mg de poudre d'email ont été dissous dans 2 mL d'acide fluorhydrique (HF) 2 M pendant une nuit. Le résidu de CaF_2 a été séparé par centrifugation et la solution a été portée à pH neutre en ajoutant 2,2 mL de KOH 2 M. Une résine échangeuse d'anions Amberlite (2,5 mL) a été ajoutée à la solution pour séparer les ions PO_4^{3-} . Après 24 h, la solution a été retirée





et la résine a été éluée avec 6 mL de NH_4NO_3 0,5 M. Après 4 h, 0,5 mL de NH_4OH et 15 mL d'une solution ammoniacale d' AgNO_3 ont été ajoutés et les échantillons ont été placés dans un bain thermostaté à 70 °C pendant 7 h, ce qui a permis la précipitation des cristaux d' Ag_3PO_4 . Les compositions isotopiques de l'oxygène ont été mesurées par une technique de pyrolyse à haute température utilisant un analyseur élémentaire VarioPYROcube connecté en flux continu à un spectromètre de masse à rapport isotopique Isoprime (technique « EA-Py-CF-IRMS » (Fourel et al., 2011; Lécuyer et al., 2007), réalisée au laboratoire de Géologie de Lyon, UMR CNRS 5276). Pour chaque échantillon, 5 aliquotes de 300 μg d' Ag_3PO_4 ont été mélangées à 300 μg de poudre de graphite pur et chargées dans des capsules en argent. La pyrolyse a été réalisée à 1 450 °C. Les mesures ont été calibrées par rapport au NBS120c (phosphorite naturelle du Miocène de Floride) et au NBS127 (sulfate de baryum, BaSO_4 : $\delta^{18}\text{O} = 9,3 \text{ ‰}$). La valeur du NBS120c a été fixée à 21,7‰ (VSMOW) (Lécuyer et al., 1993). Les échantillons de phosphate d'argent précipités à partir du standard NBS120c ont été analysés à plusieurs reprises ($\delta^{18}\text{O}_p = 21,8 \text{ ‰}$; $1\sigma = 0,3$; $n = 10$). Ces échantillons de phosphate d'argent dérivés du standard NBS120c ont été réalisés durant les mêmes phases de traitement chimique que celles appliquées aux échantillons de bioapatites fossiles pour s'assurer qu'aucun fractionnement isotopique ne s'est produit au cours de la chimie humide. L'écart-type moyen était de $0,25 \pm 0,11 \text{ ‰}$. s.e.m. Les données sont rapportées en tant que valeurs de $\delta^{18}\text{O}_p$ et exprimée en « ‰ » par rapport à la référence internationale VSMOW.

Analyse du $\delta^{34}\text{S}$. Les échantillons d'eau ont été filtrés sur un système Millipore à l'aide

de filtres en acétate de cellulose de 0,45- μm . Les solutions filtrées ont ensuite été chauffées à 70 °C et une solution de dichlorate de baryum (BaCl_2) à 5 % a été ajoutée goutte à goutte pour précipiter les sulfates (SO_4^{2-}) sous forme de sulfate de baryum (BaSO_4). Les compositions isotopiques du soufre ont été mesurées à l'aide d'un analyseur élémentaire VarioPYROcube en mode de combustion NCS connecté en mode flux continu avec un spectromètre de masse à rapport isotopique Isoprime 100 à la plateforme d'Écologie Isotopique hébergée par le Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés' (LEHNA, UMR CNRS 5023, Villeurbanne, France). Les sulfates de baryum des échantillons d'eau ont été analysés en pesant 3 aliquotes de 250 μg dans des capsules en étain. Les mesures ont été étalonnées par rapport aux trois références internationales de sulfate de baryum, NBS127, IAEA-SO-5 et IAEA-SO-6. Les échantillons d'os ont été analysés en pesant 3 aliquotes de 7 mg de poudre d'apatite fossile ont été mélangées à 20 mg de poudre d'oxyde de tungstène (WO_3) pur et chargées dans des capsules en étain. L'oxyde de tungstène est un oxydant puissant qui assure la décomposition thermique complète du sulfate d'apatite en dioxyde de soufre (SO_2) gazeux (Olsen & Larsen, 1993). Les mesures ont été calibrées par rapport aux références internationales NBS127 et S1 (sulfure d'argent, Ag_2S). Pour chaque série d'analyses d'échantillons d'os, nous avons également analysé des échantillons de BCR32 en tant que standard compositionnel ($\text{S}^{\circ} = 0,72 \text{ ‰}$, valeur certifiée²) et isotopique ($\delta^{34}\text{S} = 18,4 \text{ ‰}$ (Fourel et al., 2015; Goedert et al., 2016)) afin de nous assurer que les conditions analytiques étaient optimales pour effectuer des analyses isotopiques du soufre sur des

² Community Bureau of Reference. Certified reference material certificate of analyses for BCR No. 32.

Commission of the European Communities, Report No. 541. (1982).



échantillons à faible teneur en soufre (apatite de l'os). L'écart-type des mesures de $\delta^{34}\text{S}$ est $< 0,3\%$. Les données sont rapportées en tant que valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ et exprimée en « ‰ » par

rapport à la référence internationale VCDT. L'analyseur élémentaire VarioPYROcube a également été utilisé pour mesurer la teneur en soufre des échantillons.

On cherche à vérifier si les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ des tissus osseux des vertébrés actuels échantillonnés sont en accord avec les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ de l'eau dans laquelle ils vivent (pour pouvoir ensuite utiliser cette méthode sur les tétrapodes fossiles). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 2.

III Résultats

- **Résultats obtenus pour les vertébrés actuel**

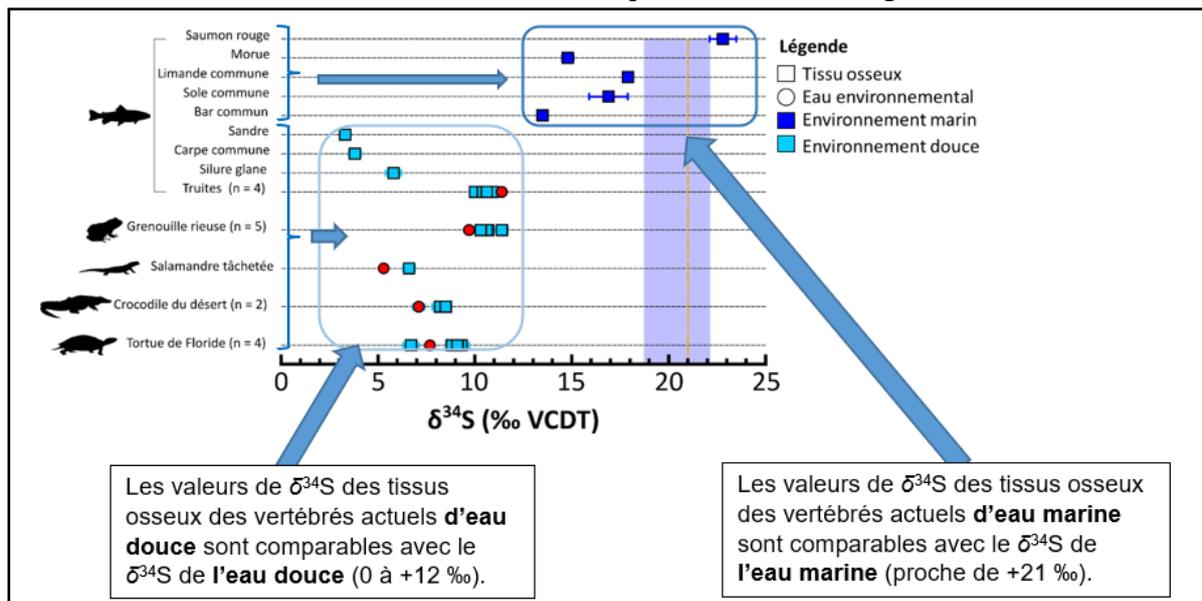


Figure 2. Composition isotopique stable du soufre ($\delta^{34}\text{S}$) du tissu osseux et de l'eau environnementale de différentes espèces de vertébrés actuels. Modifié d'après Goedert et al. (2018).

Les résultats démontrent que les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ des tissus osseux permettent :

de tracer directement la salinité des milieux de vie.

de différencier les espèces vivant dans les environnements marins de celles vivant dans les environnements d'eau douce.

Nous pouvons ainsi utiliser le principe d'actualisme pour appliquer cette méthode sur les tissus osseux des premiers tétrapodes afin de déterminer le type d'eau dans lequel ils

vivaient. Elle sera complétée par l'étude de la composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de l'os qui est également un traceur des environnements aquatiques déjà connu.

- **Résultats obtenus pour les premiers tétrapodes**

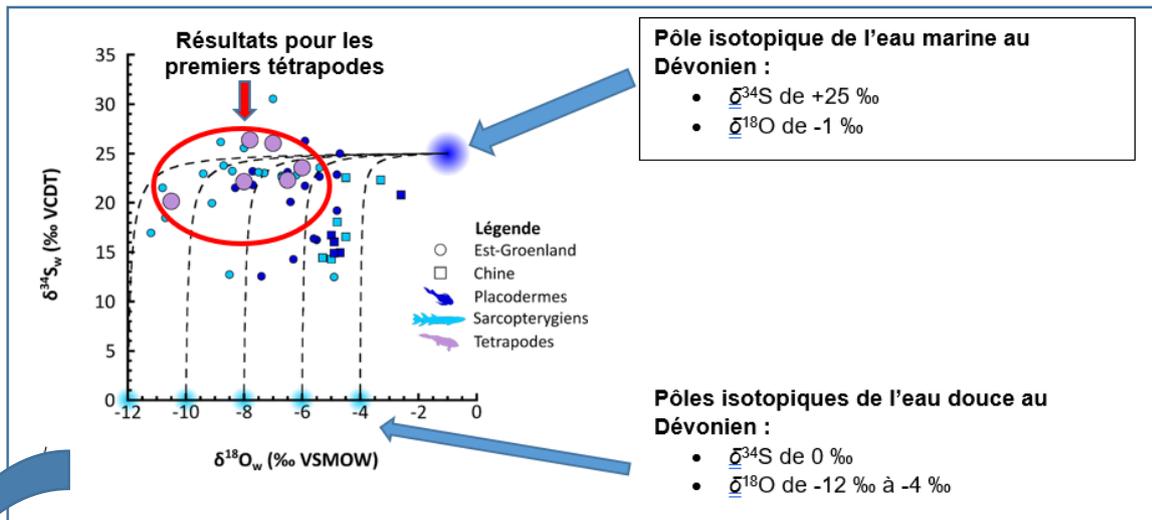


Figure 3. Compositions isotopiques stables du soufre ($\delta^{34}\text{S}$) et de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de l'eau environnemental estimées à partir des valeurs des tissus osseux fossiles de premiers tétrapodes et d'espèces associées du Dévonien supérieur. Modifié d'après Goedert et al. (2018).

Tableau 1. Comparaison de la composition isotopique des eaux douces dévoniennes, de l'eau marine dévoniennne et de celles déduites des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ des tissus osseux des premiers tétrapodes.

	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Eau douce dévoniennne	0	De -12 à -4
Eau marine dévoniennne	+25	-1
Résultats : Tissus osseux des premiers tétrapodes et de leur faune associée	De +20 à +26	De -11 à -4

IV Discussion

Nous constatons que les six échantillons de premiers tétrapodes mesurés ont des valeurs de composition isotopique du soufre élevées (de +20 à +26 ‰ ; Figure 3), qui sont donc compatibles avec celles de l'eau marine dévoniennne (de +25 ‰) qui traduisent donc l'influence marine de leur environnement de vie. Cependant, nous constatons également que leurs valeurs de composition isotopique de l'oxygène (de -11 à -6 ‰) sont compatibles avec celles des eaux douces dévoniennes (-12 à -4 ‰), mettant ainsi en évidence une quantité importante d'eau douce dans leur

environnement. La composition isotopique du soufre et de l'oxygène des os des premiers tétrapodes enregistre donc à la fois l'influence d'eau marine et d'eau douce de leur environnement de vie aquatique.

La salinité joue un rôle primordial dans la structuration des écosystèmes aquatiques actuels. De nombreuses espèces de poissons sont capables de tolérer des environnements aquatiques de salinités variables. Au sein d'une même espèce on observe des individus résidant toute leur vie dans un environnement aquatique de salinité donnée et d'autres individus résidant toute leur vie dans un environnement aquatique de salinité différente. On parle dans ce cas



d'euryhalinité* au sens écologique. Toujours au sein d'une même espèce certains individus fréquentent des environnements aquatiques de salinités variables au cours de leur vie, ils sont capables de migrer par exemple d'un environnement d'eau douce à un environnement marin (comme les saumons ou les anguilles par exemple), on parle alors d'euryhalinité au sens physiologique. Dans notre étude nous avons effectué une analyse unique par échantillon il n'est donc pas possible de dire si les valeurs isotopiques traduisant à la fois une influence d'eau douce et d'eau marine sont le résultat d'un comportement migratoire entre des masses d'eau de salinités différentes (euryhalinité écologique) ou seulement d'un comportement sédentaire dans des environnements aquatiques de transition à la salinité variable (estuaires et deltas).

Une étude récente publiée par Goedert et al. (2024) démontre que les compositions isotopiques du soufre et de l'oxygène des tissus squelettiques fossilisés permettent de tracer finement la salinité relative de différents environnements aquatiques le long d'un système fluvial jusqu'aux environnements marins côtiers. Cette même étude suggère également que les premiers tétrapodes trouvés dans les gisements pennsylvaniens (USA) de la fin du Dévonien seraient quant à eux cantonnés aux environnements aquatiques d'eau douce.

Les rares données isotopiques disponibles à ce jour pour des espèces de premiers tétrapodes et de leur faune de vertébrés associés (Goedert et al., 2018, 2024) suggèrent donc que la salinité structurait déjà fortement les écosystèmes aquatiques du Dévonien supérieur et que différentes espèces

de premiers tétrapodes fréquentaient des environnements de différentes salinités.

A l'aune de ces résultats, la vision archaïque et simplifiée - mais toujours étonnement tenace dans la littérature (Lu et al., 2024) - des grandes transitions écologiques qui se mettent en place à la fin du Dévonien apparaît beaucoup plus complexe lorsqu'on l'étudie à travers le prisme de la salinité ; ce qui ne devrait pas nous étonner compte tenu de ce qu'on observe dans les environnements aquatiques actuels.

V Conclusion

Les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ des os des premiers tétrapodes traduisent **à la fois l'influence marine et d'eau douce de leur milieu de vie**. On en déduit donc qu'au moins certaines espèces de premiers tétrapodes vivaient dans des **environnements de transition** tels que les **estuaires ou les deltas**. En effet, dans ces environnements, les eaux marines se mélangent aux eaux douces, la salinité y est donc variable.

Certaines espèces de premiers tétrapodes étaient donc probablement adaptées à tolérer une grande gamme de salinité (ce qui n'est pas le cas de toutes les espèces) : on appelle cette capacité **l'euryhalinité**.

On peut supposer que cette capacité à tolérer de larges gammes de salinité leur aurait permis de trouver des environnements aquatiques « refuges » et de survivre à la crise biologique qui affecte largement les environnements marins à la fin du Dévonien et qui a provoqué la disparition d'au moins 70% des espèces sur la Terre (McGhee Jr, 2006).





LEXIQUE :

Isotope : qualifie des éléments chimiques ayant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons (exemples pour les isotopes stables du soufre : ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S et ^{36}S).

Isotope stable : isotopes qui ne se désintègrent pas avec le temps, contrairement aux isotopes radioactifs.

Paradigme : ensemble de croyances, de valeurs, de techniques et de méthodes partagées par une communauté scientifique ou un groupe social. Il constitue le cadre de référence à partir duquel ces groupes interprètent et comprennent le monde.

Principe d'actualisme : théorie en géologie qui postule que les processus géologiques actuels se sont déroulés de la même manière tout au long de l'histoire de la Terre. Ce principe permet aux géologues de comprendre l'histoire de la Terre en observant les processus actuels.

Apatite : minéral qui compose les tissus squelettiques (os, dent, écaille) dont la formule chimique générale est : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$. Le soufre est présent en petite quantité (< 1% en masse) dans les apatites sous la forme de sulfates (SO_4^{2-}) qui remplacent les groupements phosphates (PO_4^{3-}) dans la maille cristalline.

Euryhalinité : capacité de certains organismes aquatiques à tolérer une large gamme de salinité dans leur environnement.

Références :

Agassiz, L. (1844). Monographie Des Poissons Fossiles Du Vieux Grès Rouge Ou Système Dévonien (Old Red Sandstone) Des Iles Britanniques Et De Russie, Par L. Agassiz. Ouvrage rédigé à la demande de l'Association Britannique pour l'avancement des sciences et présenté par extraits à sa réunion à Manchester en 1842 (Vol. 2). Aux frais de l'auteur.

Ahlberg, P. E. (1995). *Elginerpeton pancheni* and the earliest tetrapod clade. *Nature*, 373(6513), 420-425.

Ahlberg, P. E., Luksevics, E., & Lebedev, O. (1994). The first tetrapod finds from the Devonian (Upper Famennian) of Latvia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 343(1305), 303-328.

Barrell, J. (1916). Influence of Silurian-Devonian climates on the rise of air-breathing vertebrates. *Bulletin of the Geological Society of America*, 27(1), 387-436.

Blieck, A., Clement, G., Blom, H., Lelievre, H., Luksevics, E., StreeL, M., Thorez, J., & Young, G. C. (2007). The biostratigraphical and palaeogeographical framework of the earliest diversification of tetrapods (Late Devonian). Geological Society, London, Special Publications,

11

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.





278(1), 219-235. <https://doi.org/10.1144/SP278.10>

Blom, H., Clack, J. A., Ahlberg, P. E., & Friedman, M. (2007). Devonian vertebrates from East Greenland : A review of faunal composition and distribution. *Geodiversitas*, 29(1), 119-141.

Bray, A., & Lawson, J. D. (1985). The evolution of the terrestrial vertebrates : Environmental and physiological considerations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 309(1138), 289-322.

Campbell, K., & Bell, M. (1977). A primitive amphibian from the Late Devonian of New South Wales. *Alcheringa*, 1(4), 369-381.

Carr, R. K., & Jackson, G. L. (2008). The vertebrate fauna of the Cleveland Member (Famennian) of the Ohio Shale. Guide to the Geology and Paleontology of the Cleveland Member of the Ohio Shale (68th Annual Meeting of the Society of Vertebrate Paleontology, Cleveland, Ohio).

Clack, J. A., Ahlberg, P. E., Blom, H., & Finney, S. M. (2012). A new genus of Devonian tetrapod from North-East Greenland, with new information on the lower jaw of *Ichthyostega*. *Palaeontology*, 55(1), 73-86. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2011.01117.x>

Clack, J. A., Ahlberg, P. E., Finney, S., Dominguez Alonso, P., Robinson, J., & Ketcham, R. A. (2003). A uniquely specialized ear in a very early tetrapod. *Nature*, 425(6953), 65-69.

Clément, G., Ahlberg, P. E., Blicek, A., Blom, H., Clack, J. A., Poty, E., Thorez, J., & Janvier, P. (2004). Devonian tetrapod from western Europe. *Nature*, 427(6973), 412-413. <https://doi.org/10.1038/427412a>

Coates, M., & Clack, J. A. (1990). Polydactyly in the earliest known tetrapod limbs. *Nature*, 347(6288), 66-69.

Crowson, R. A., Showers, W. J., Wright, E. K., & Hoering, T. C. (1991). Preparation of phosphate samples for oxygen isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 63(20), 2397-2400. <https://doi.org/10.1021/ac00020a038>

Daeschler, E. B., Shubin, N. H., Thomson, K. S., & Amaral, W. W. (1994). A Devonian Tetrapod from North America. *Science*, 265(5172), 639-642. <https://doi.org/10.1126/science.265.5172.639>

Fourel, F., Martineau, F., Lécuyer, C., Kupka, H.-J., Lange, L., Ojeimi, C., & Seed, M. (2011). ¹⁸O/¹⁶O ratio measurements of inorganic and organic materials by elemental analysis–pyrolysis–isotope ratio mass spectrometry continuous-flow techniques. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25(19), 2691-2696. <https://doi.org/10.1002/rcm.5056>





Fourel, F., Martineau, F., Seris, M., & Lécuyer, C. (2015). Measurement of $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ Ratios of NBS 120c and BCR 32 Phosphorites Using Purge and Trap EA-IRMS Technology. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(1), 47-53. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2014.00297.x>

Godwin-Austen, R. (1855). On the possible extension of the coal-measures beneath the south-eastern part of England. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 11(1-2), 533-536.

Goedert, J., Broussard, D., Trop, J., Daeschler, E., Amiot, R., Fourel, F., Olive, S., Vinçon-Laugier, A., & Lécuyer, C. (2024). Oxygen and sulfur stable isotope ratios of Late Devonian vertebrates trace the relative salinity of their aquatic environments. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B37631.1>

Goedert, J., Fourel, F., Amiot, R., Simon, L., & Lécuyer, C. (2016). High-precision $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ measurements in vertebrate bioapatites using purge-and-trap elemental analyser/isotope ratio mass spectrometry technology. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 30(18), 2002-2008. <https://doi.org/10.1002/rcm.7690>

Goedert, J., Lécuyer, C., Amiot, R., Arnaud-Godet, F., Wang, X., Cui, L., Cuny, G., Douay, G., Fourel, F., & Panczer, G. (2018). Euryhaline ecology of early tetrapods revealed by stable isotopes. *Nature*, 558(7708), 68-72.

Laurin, M., & Soler-Gijón, R. (2010). Osmotic tolerance and habitat of early stegocephalians : Indirect evidence from parsimony, taphonomy, palaeobiogeography, physiology and morphology. *Geological Society, London, Special Publications*, 339(1), 151-179.

Lebedev, O. (2004). A new tetrapod *Jakubsonia livnensis* from the Early Famennian (Devonian) of Russia and palaeoecological remarks on the Late Devonian tetrapod habitats. *Acta Universitatis Tatviensis*, 679, 79-98.

Lebedev, O. A., & Clack, J. A. (1993). Upper Devonian tetrapods from Andreyevka, Tula region, Russia. *Upper Devonian tetrapods from Andreyevka, Tula region, Russia*, 36(3), 721-734.

Lécuyer, C., Fourel, F., Martineau, F., Amiot, R., Bernard, A., Daux, V., Escarguel, G., & Morrison, J. (2007). High-precision determination of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of silver phosphate by EA-pyrolysis-IRMS continuous flow technique. *Journal of Mass Spectrometry*, 42(1), 36-41. <https://doi.org/10.1002/jms.1130>

Lécuyer, C., Grandjean, P., O'Neil, J. R., Cappetta, H., & Martineau, F. (1993). Thermal excursions in the ocean at the Cretaceous—Tertiary boundary (northern Morocco) : $\delta^{18}\text{O}$ record of phosphatic fish debris. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105(3-4), 235-243.





Lu, C., Cui, X.-D., Chen, J., Cui, Z.-X., Zhu, M., & Xu, Y.-G. (2024). Devonian sea surface temperature and paleoecology changes constrained by in situ oxygen isotopes of fish fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 639, 112059. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112059>

Marshall, J. E. A., Astin, T. R., & Clack, J. A. (1999). East Greenland tetrapods are Devonian in age. *Geology*, 27(7), 637-640. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0637:EGTADI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0637:EGTADI>2.3.CO;2)

Martin, J. E., Tacail, T., & Balter, V. (2017). Non-traditional isotope perspectives in vertebrate palaeobiology. *Palaeontology*, 60(4), 485-502. <https://doi.org/10.1111/pala.12300>

McClay, Norton, M., Coney, P., & Davis, G. (1986). Collapse of the Caledonian orogen and the Old Red Sandstone. *Nature*, 323(6084), 147-149.

McGhee Jr, G. R. (2006). Extinction : Late Devonian Mass Extinction. In eLS. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1038/npg.els.0004177>

Nehlich, O. (2015). The application of sulphur isotope analyses in archaeological research : A review. *Earth-Science Reviews*, 142, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.12.002>

Niedźwiedzki, G., Szrek, P., Narkiewicz, K., Narkiewicz, M., & Ahlberg, P. E. (2010). Tetrapod trackways from the early Middle Devonian period of Poland. *Nature*, 463(7277), 43-48.

Olsen, H., & Larsen, P. H. (1993). Lithostratigraphy of the continental Devonian sediments in North-East Greenland. *Bulletin Grønlands Geologiske Undersøgelse*, 165, 1-108. <https://doi.org/10.34194/bullggu.v165.6721>

Pan, J., Huo, F., Cao, J., Gu, Q., Liu, S., Wang, J., Gao, L., & Liu, C. (1987). Continental Devonian System of Ningxia and its biotas. Beijing: Geol Publ House, 1-237.

Pierce, S. E., Clack, J. A., & Hutchinson, J. R. (2012). Three-dimensional limb joint mobility in the early tetrapod *Ichthyostega*. *Nature*, 486(7404), 523-526.

Säve-Söderbergh, G. (1932). Preliminary Note on Devonian Stegocephalians from East Greenland, &c.

Schmitz, B., ÅBERG, G., Werdelin, L., Forey, P., & Bendix-Almgreen, S. E. (1991). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, Na, F, Sr, and La in skeletal fish debris as a measure of the paleosalinity of fossil-fish habitats. *Geological Society of America Bulletin*, 103(6), 786-794.

Schultze, H.-P., & Cloutier, R. (1996). Comparison of the Escuminac Formation ichthyofauna with other late Givetian/early Frasnian ichthyofaunas. *Devonian fishes and plants of Miguasha, Quebec, Canada*, 348-368.





Shubin, N. H., Daeschler, E. B., & Coates, M. I. (2004). The Early Evolution of the Tetrapod Humerus. *Science*, 304(5667), 90-93. <https://doi.org/10.1126/science.1094295>

Trueman, C. N., & Tuross, N. (2002). Trace Elements in Recent and Fossil Bone Apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 489-521. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.13>

Woodward, A. S. (1889). *Catalogue of the Fossil Fishes in the British Museum (Natural History.)* (Vol. 1). Taylor & Francis.

Zhu, M., Ahlberg, P. E., Zhao, W., & Jia, L. (2002). First Devonian tetrapod from Asia. *Nature*, 420(6917), 760-761. <https://doi.org/10.1038/420760a>

Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration avec Jean Goedert, chercheur en paléontologie/géochimie (par ordre alphabétique) : AFONSO FERNANDES Beatriz, AIT ININOU DELCOURT Shayna, ALONSO Elena, AZAÏS Cameron, CHAOUI Nada, CHOCHOY-VANDECRUX Leo, COLAS Myla, CRIBIER Enola, CRISTOS Victoria, DE COMMINES DE MARSILLY Juliette, DUIZABO Léopold, DUPOUY Aïnhua, FU Lucas, LACAN Pablo, LAFOURCADE Lohan, LAHOURCADE Zoé, LANGEVELD--ORRELL Tarkin, LASSALLE Naïcia, LATERRADE Martin, LE PAGE Mahina, LEVEAU Sacha, MARCADIEU Alice, POLONI Lizenn, RIBAUDO Enzo, VIGNOLA Chris, YRIARTE Amaya, ZEMOUR FORTUNA Mei-Lin

Comment citer cet article : Jean Goedert et la 3^{ème} B du collège Aimé Césaire (St Geours de Marenne, FR), *Le milieu de vie aquatique des premiers tétrapodes : une histoire de delta ?*, Journal DECODER, 2024-06-28



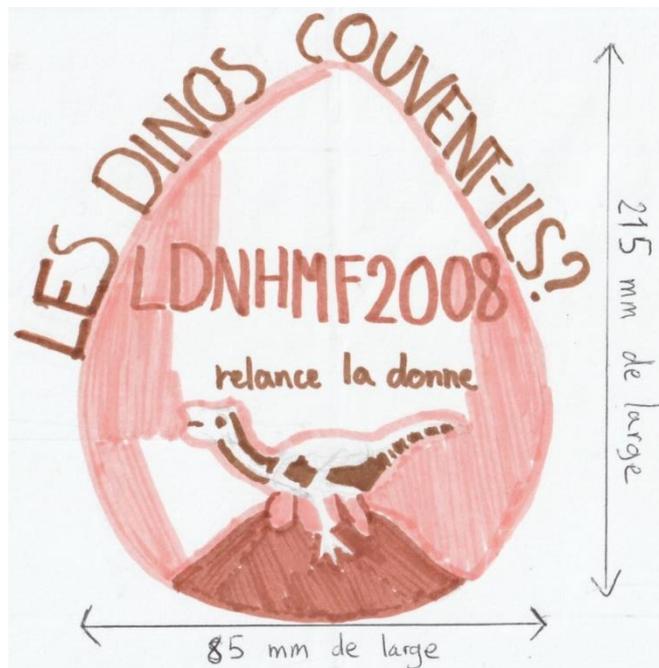
Les dinosaures couvaient-ils leurs œufs ?

Romain Amoît¹ (enseignant-chercheur) et la classe de 2nd 9 du lycée Pierre Brossolette de Mme Christine Louis² et Mr Odile Descos² (*la liste des élèves est mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article: Bi, Shundong, Romain Amoît, Claire Peyre de Fabrègues, Michael Pittman, Matthew C. Lamanna, Yilun Yu, Congyu Yu, et al. « An oviraptorid preserved atop an embryo-bearing egg clutch sheds light on the reproductive biology of non-avian theropod dinosaurs ». *Science Bulletin* 66, n° 9 (15 mai 2021): 947-54. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.12.018>.

Institution : ¹ CNRS UMR 5276, Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement, 2 rue Raphaël Dubois, 69622 Villeurbanne Cedex.

²Lycée Pierre Brossolette, 1 Esplanade Agnès Varda, 69100 Villeurbanne



©Penda, Ambre et Marion

Résumé :

L'origine de la biologie de reproduction des oiseaux actuels pose beaucoup de questions. Ce questionnement est dû à la découverte de similitudes avec les dinosaures non aviens, notamment au niveau de la couvaison. La découverte d'un spécimen fossile dans le sud de la Chine apporte des éléments nouveaux à la compréhension des stratégies de reproduction des dinosaures non aviens.

Le spécimen étudié est un squelette de théropode adulte fossilisé en position accroupie au sommet d'une ponte de 24 œufs.

Des analyses phylogénétiques, histologiques et isotopiques ont été réalisées. Les résultats confirment qu'il s'agit d'un individu fossilisé en posture de couvaison. Les études ontogénétiques indiquent que c'est un adulte. Quant au sexe, il n'est pas déterminé.

Les œufs trouvés dans le nid contiennent des embryons à différents stades de développement,

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



suggérant une stratégie d'éclosion asynchrone. La température d'incubation chez ces théropodes non aviens correspond à celle des dinosaures aviens.

Le résultat de toutes ces analyses atteste bien l'hypothèse que la reproduction des oiseaux n'est pas issue d'un processus évolutif linéaire, mais que diverses caractéristiques liées à la reproduction avienne sont apparues indépendamment au sein de leurs ancêtres dinosauriens. D'autres études viennent confirmer que l'évolution de la biologie de reproduction des oiseaux modernes s'est faite progressivement et certaines caractéristiques sont issues des théropodes non aviens.

Mots clés : oviraptorosaures ; couvaion ; éclosion asynchrone ; delta ¹⁸O ; phylogénie

I Introduction

La biologie de reproduction des oiseaux modernes diffère de celle des autres vertébrés actuels, et son évolution a suscité beaucoup d'études. Une découverte clé liée à l'évolution de la biologie de reproduction des oiseaux modernes est le comportement de couvaion identifié chez les dinosaures non aviens par plusieurs spécimens. Ces derniers sont des squelettes d'oviraptorosaures préservés accroupis sur des amas d'œufs découverts en Chine et en Mongolie. L'interprétation d'une couvaion pour ces spécimens adultes associés à la ponte représente l'hypothèse privilégiée, mais d'autres interprétations valables existent également, y compris celles selon lesquelles le parent a péri en train de pondre ou de protéger ses œufs. Il n'existe aucune preuve rejetant de manière indiscutable la mort de l'adulte pendant la ponte. Plusieurs indices montrent que la mort de la femelle pendant la ponte est plus vraisemblable que lors de la couvaion. En effet, il existe des différences significatives de taille entre les différentes pontes découvertes. Ces différences pourraient correspondre à différentes étapes de la construction du nid. L'autre argument majeur privilégiant la mort de la femelle pendant la ponte est le contact limité entre les œufs et l'adulte. Nous décrivons ici un nouveau spécimen qui renforce non seulement l'hypothèse de la

couvaion pour les oviraptorosaures, et qui fournit également des informations sur la biologie de reproduction des théropodes non aviens et d'autres groupes de théropodes.

II Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Le spécimen LDNHMF2008 (conservé au Lande Museum of Natural History, Tangshan, province du Hebei, Chine) est un squelette partiellement articulé d'un théropode de la famille des Oviraptoridae de taille moyenne auquel il manque le crâne, une partie des vertèbres cervicales, d'une grande partie des vertèbres dorsales et caudales, des ceintures pectorales et une majeure partie des humérus, préservé au sommet d'une ponte d'au moins 24 œufs non perturbés, dont certains sont cassés, laissant apparaître des os embryonnaires (Fig. 1). Le spécimen a été découvert dans le Crétacé supérieur (Maastrichtien ; entre -72 et -66 MA) de la formation de Nanxiong près de la gare de Ganzhou, dans la province du Jiangxi en Chine.



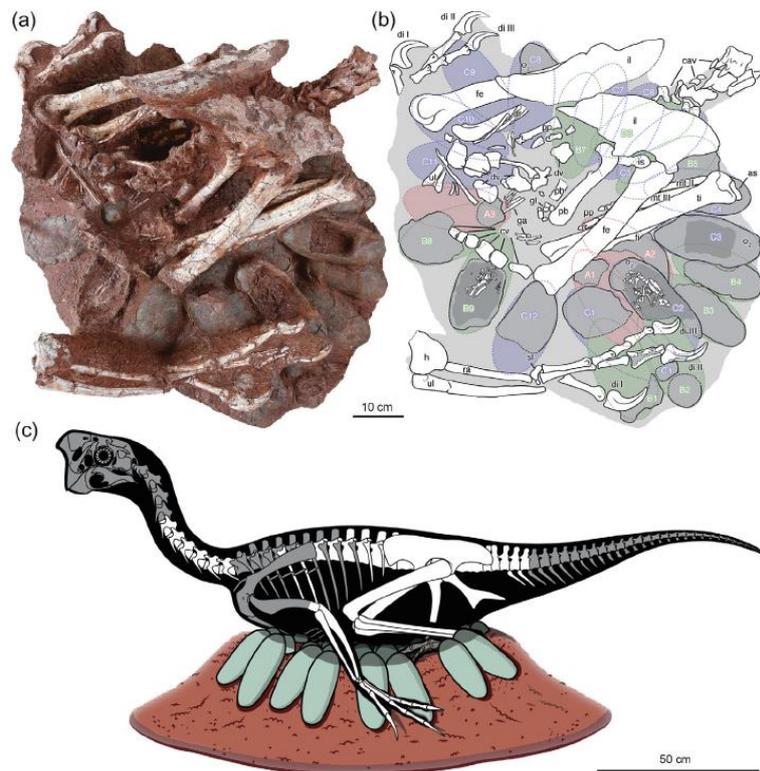


Figure. 1 : LDNHMF2008, un spécimen d'oviraptorosaure comprenant un squelette d'adulte préservé au-dessus d'un amas d'œufs contenant des embryons (Bi et al., 2021). (a) Photographie. (b) Dessin interprétatif avec les os et les gastrolithes en blanc et les œufs codés par cercle (A(A1–A3), rouge ; B(B1–B9), vert ; C(C1–C12), bleu). (c) Restauration (le blanc indique les os préservés dans le squelette de l'adulte). Abréviations utilisées dans le dessin interprétatif : I, doigt I ; II, doigt II ; III, doigt III ; A#, œuf dans le cercle le plus bas (A) ; as, astragale ; B#, œuf dans le cercle du milieu (B) ; C#, œuf dans le cercle supérieur (C) ; cav, vertèbre caudale ; ch, chevron ; cv, vertèbre cervicale ; di, doigt de la main ; dr, côtes dorsales ; dv, vertèbre dorsale ; em, œuf connu pour préserver un embryon ; fe, fémur ; fi, fibula ; ga, gastralium ; gl, gastrolithes ; h, humérus ; il, ilium ; is, ischium ; mt, métatarsien ; O2, œuf échantillonné pour une analyse isotopique de l'oxygène ; pb, pubis ; pp, phalanges pédiennes ; ra, radius ; sl, carpe semi-lunaire ; ti, tibia ; ul, ulna. Notez que C11 et C12 ne sont pas des œufs appariés. Les œufs qui auraient été appariés avec C11 et C12 ne sont probablement pas préservés, comme c'est le cas pour certains autres œufs et éléments squelettiques.

2.2 Analyses histologiques

Des échantillons de coquilles d'œufs ont

été prélevés sur les œufs C2, C5 et C8 (Fig. 1), tous préparés sous forme de lames minces pétrographiques et étudiés au microscope à

3

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

lumière polarisée. Un gastrialeum et l'humérus de l'adulte ont également été échantillonnés pour la préparation de lames minces ostéohistologiques, qui ont été étudiées au microscope à lumière polarisée pour examiner l'histologie osseuse.

L'analyse histologique est une méthode utilisée en biologie, en médecine et en paléontologie pour étudier la structure microscopique des tissus biologiques. L'histologie est la discipline qui consiste à prélever des échantillons de tissus (généralement à partir de biopsies ou de prélèvements post-mortem), à les traiter, à les

couper en fines sections, à les colorer avec des colorants spécifiques, et à les examiner au microscope pour étudier leur composition cellulaire, leur organisation et leur relation avec d'autres tissus osseux

2.3 Analyses phylogénétiques

La phylogénie est l'étude des liens de parenté entre différentes espèces. Elle est souvent représentée sous formes d'arbres pour montrer les relations entre des espèces partageant un ancêtre commun (Fig. 2).

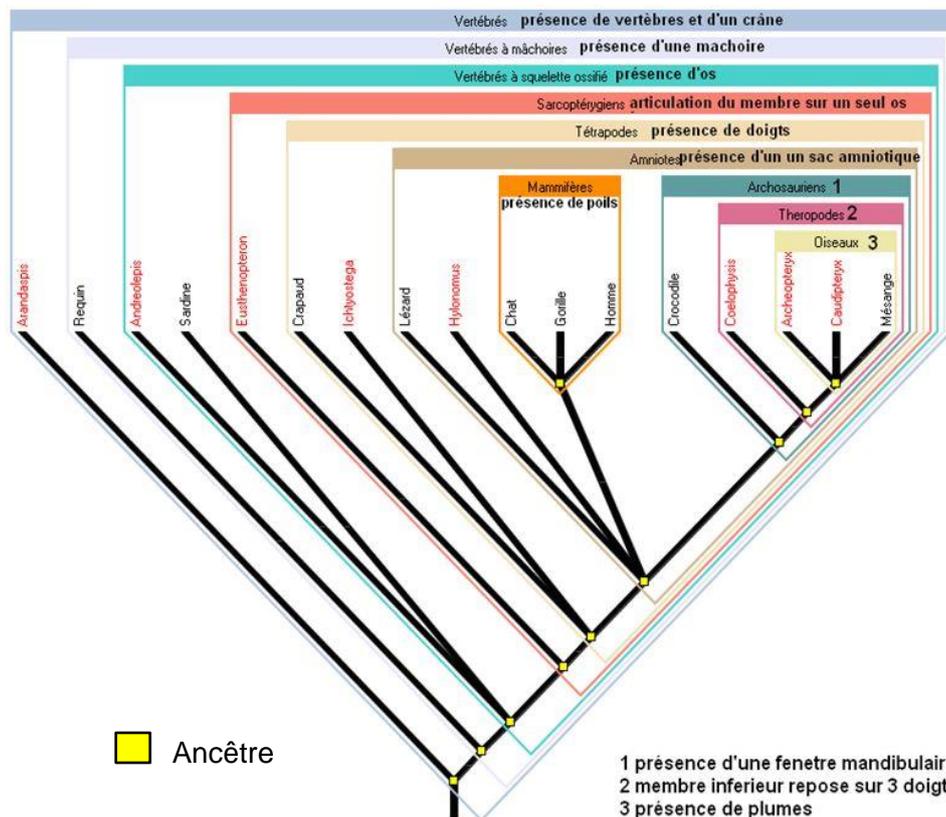


Figure.2 : Arbre phylogénétique simplifié des vertébrés (création originale des élèves réalisée à partir du logiciel Phylogène, équipe ACCES, IFE)

Chaque ancêtre commun partage des caractéristiques anatomiques propres avec les espèces issues de cet ancêtre commun. Un caractère qui ne subit pas de

modification au cours de l'évolution est appelé caractère plésiomorphe ou caractère ancestral. C'est le cas de la ponte synchrone (ponte au sein de laquelle tous les œufs se développent et éclosent en même temps).

Un caractère résultant d'une modification au cours de l'évolution est appelé caractère dérivé. C'est le cas de la ponte asynchrone (Ponte au sein de laquelle les œufs n'éclosent pas tous en même temps mais sur une période). Il s'agit d'une modification du type de ponte au cours de l'évolution.

La position systématique du nouveau spécimen a été déterminée grâce à deux analyses distinctes en utilisant un logiciel d'analyse phylogénétique. Tout d'abord une

analyse phylogénétique basée sur un ensemble de données de théropodes coelurosauriens récemment publié avec l'ajout de LDNHMF2008 a été réalisée. Une deuxième analyse phylogénétique a été réalisée en utilisant un ensemble de données récemment publié sur la phylogénie des oviraptorosaures avec l'ajout de LDNHMF2008.

2.4 Analyses isotopiques

Les isotopes sont des atomes qui possèdent un même nombre d'électrons et donc de protons pour rester neutres, mais un nombre différent de neutrons (Fig.3).

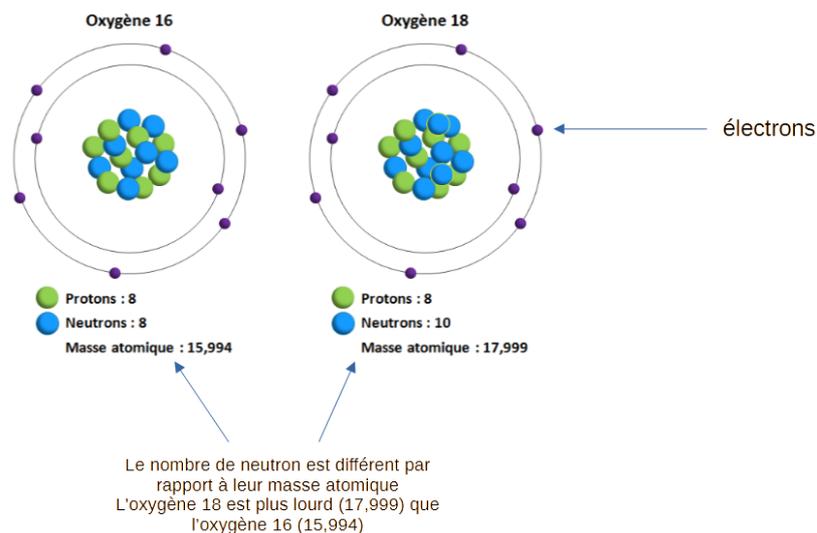


Figure. 3 : Représentation schématique des deux principaux isotopes stables de l'atome d'oxygène (<https://svt.enseigne.ac-lyon.fr/>)

Les phosphates issus de l'apatite des os embryonnaires ont été préparés et leurs compositions isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}_p$) ont été analysées.

Le $\delta^{18}\text{O}$ représente l'évolution positive ou négative du rapport isotopique ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'échantillon par rapport à une valeur de référence.

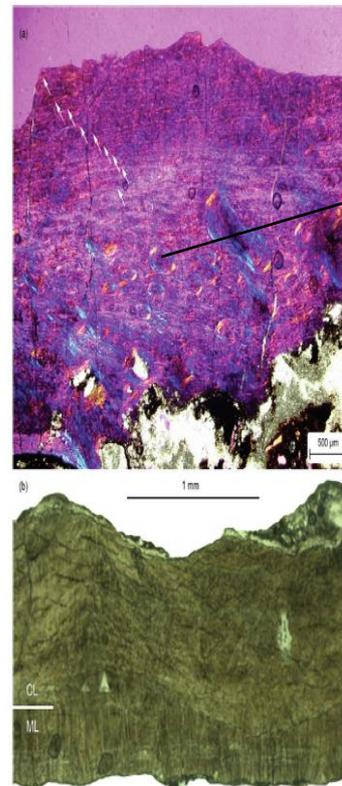
III Résultats

Le spécimen LDNHMF2008 présente la posture de couvain in situ typique observée sur d'autres oviraptorosaures préservés au sommet de pontes d'œufs (*Citipati osmolskae* : IGM 100/979, IGM 100/1004 ; *Nemegtomaia barsboldi* : MPC-D 107/15 ;

Oviraptoridae indet. : IVPP V9608) : les membres antérieurs sont orientés ventralement et postérieurement (c'est-à-dire vers le bas et vers l'arrière), recouvrant les bords de la ponte ; les membres postérieurs sont repliés de telle manière que le corps de l'animal est situé au-dessus des œufs et centré sur la ponte. La région pelvienne repose en partie sur la partie postérieure de la ponte et en partie au centre. Le corps est préservé à une proximité extrêmement étroite des œufs (Fig. 1).

Le spécimen est vraisemblablement un adulte, comme l'indique la structure anatomique des vertèbres observées. Une analyse du tissu osseux a été réalisée pour en déterminer davantage sur son stade de développement. Pour ce faire, des lames minces d'os sont observées (Fig. 4a). Les observations réalisées ont permis de conclure que l'individu étudié était un adulte.

Les lames minces montrent clairement l'absence d'os médullaire dans l'**humérus*** et le **gastrialium***. L'os médullaire est produit exclusivement par la femelle pendant une période et sert de stockage de calcium qui est ensuite utilisé pour la minéralisation des coquilles d'œufs. On peut supposer que l'individu est un mâle car il n'a pas d'os médullaire mais on ne peut pas totalement exclure que ce soit une femelle.



Ostéons caractéristiques d'un stade adulte

Figure. 4 : Histologie osseuse et de coquille d'œuf de LDNHMF2008 (Bi et al., 2021). (a) Coupe transversale de l'humérus sous lumière polarisée.

Le squelette adulte présente des caractéristiques anatomiques générales typiques des oviraptorosaures, de plus, le spécimen LDNHMF2008 a été identifié comme faisant partie de la famille des Oviraptoridae. Cette détermination a été obtenue grâce aux analyses phylogénétiques basées sur l'étude des caractères présents sur le bassin, le fémur et les os du pied de ce dinosaure. Une autre analyse osseuse basée sur les vertèbres caudales et le pubis a donné des résultats différents, indiquant une position au sein de Caenagnathoidea. (Fig. 5).

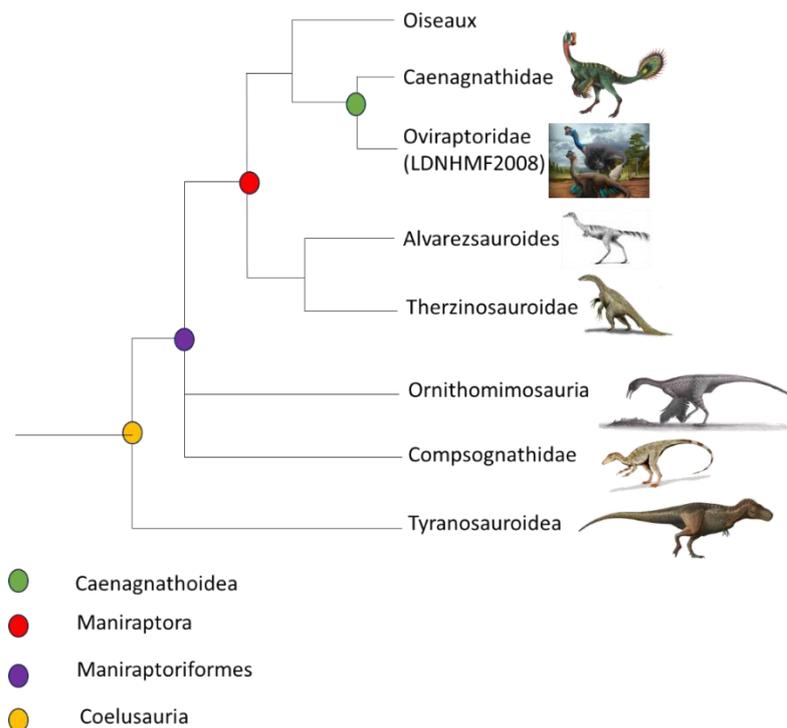


Figure. 5 : Position phylogénétique de LDNHMF2008, Arbre simplifié d'après la figure originale de l'article. Les images sont extraites : <https://www.anyrgb.com/>; Zhao Chuang ; Wikipedia ; <https://fossil.fandom.com/>

La ponte se compose d'au moins 24 œufs conservés immédiatement sous et en proximité extrêmement étroite du squelette de l'adulte, avec peu ou pas de matrice sédimentaire entre les deux. Les diamètres externe et interne de l'ensemble de la ponte sont respectivement de 78 et 26 cm. La ponte est principalement intacte. Elle ne présente qu'une légère déformation ou compression des œufs. Par ailleurs, il y a conservation de l'appariement des œufs qui sont disposés en trois cercles superposés. En effet, douze œufs sont exposés dans le cercle supérieur (cercle C), neuf dans le cercle du milieu (B), et trois dans le cercle inférieur (A). Le nombre total d'œufs est supérieur à celui rapporté dans d'autres pontes associées à des adultes oviraptoridae (de 6 à 22 œufs par ponte).

Les œufs mesurent environ 215 mm de

long et 85 mm de large (Tableau S1 en ligne). Chacune des coquilles présente une ornementation composée de fines crêtes mesurant environ 2 à 3 mm de largeur. Les crêtes sont alignées avec l'axe vertical des œufs et sont disposées de manière compacte vers son équateur mais de façons plus disparates à ses deux extrémités. La coquille d'œuf est fine, d'environ 1,08 mm d'épaisseur sans prendre en compte la crête. La coquille d'œuf est formée d'une couche dite mamillaire interne séparée par une limite ondulée surmontée d'une couche continue (Fig 4b). Grâce à la taille des œufs, à l'épaisseur de leur coquille et celle de la limite ondulée qui est distincte entre les deux autres couches de la coquille d'œuf, les œufs sont attribués à l'espèce *Macroolithus yaotunensis*.

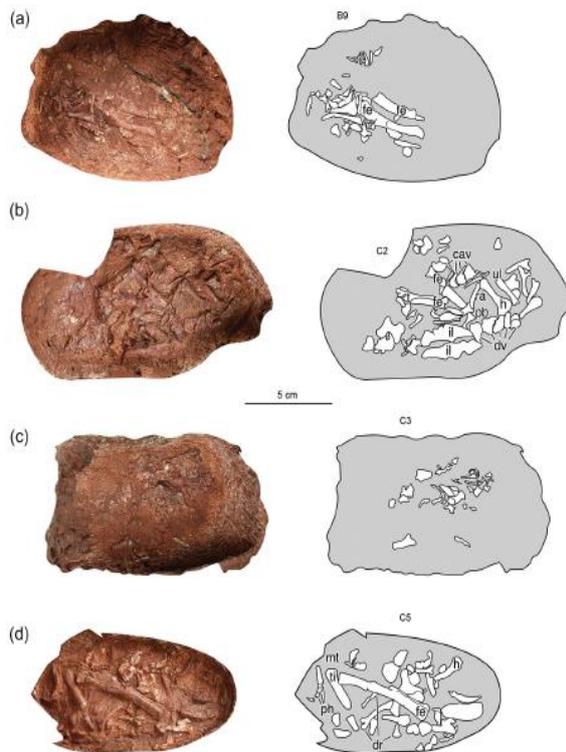


Figure 6 : Squelettes embryonnaires préservés dans LDNHMF2008 (Bi et al., 2021). Photographies et tracés des os embryonnaires dans les œufs B9 (a), C2 (b), C3 (c) et C5 (d). Abréviations : cav, vertèbres caudales ; dv, vertèbres dorsales ; fe, fémur ; h, humérus ; il, ilium ; pb, pubis ; ph, phalanges ; ra, radius ; ti, tibia ; ul, ulna.

Dans sept œufs il est possible d'observer un squelette d'embryon. Le squelette de l'œuf C2 est partiellement articulé et montre une posture recroquevillée (Fig. 6b), comme dans d'autres embryons d'oviraptorosaures. Son stade d'ossification est similaire à celui observé dans les toutes dernières étapes du développement des embryons d'oiseaux du **groupe couronne*** et d'autres oviraptorosaures. Les différences de taille et de stades de développement entre ces embryons peuvent être une conséquence de l'éclosion asynchrone, comme cela a été

suggéré précédemment pour les oviraptorosaures.

L'œuf B9 (Fig. 6a) présente moins d'éléments apparents que les œufs de la couche C. La plupart des os dans l'œuf B9 ne peuvent pas être identifiés. L'embryon dans l'œuf B9 est considéré comme étant plus précoce sur le plan du développement que ceux des œufs C2 et C5. En général, une variation de développement est observée non seulement entre les œufs de différents cercles, mais aussi à l'intérieur du même cercle.

Pour estimer la température à laquelle les embryons ont minéralisé leurs squelettes, les compositions isotopiques de l'oxygène du phosphate de l'hydroxyapatite des os embryonnaires et du carbonate de la coquille des œufs ont été mesurées et analysées (œufs analysés : C2, C3, C8). Cette mesure consiste à déterminer la proportion de ^{18}O et de ^{16}O dans la coquille et dans les os.

Avant d'exploiter les mesures, rappelons ce qu'est un os et où est situé l'atome d'oxygène étudié. Un os est une structure rigide constituée de composants organiques et inorganiques.

Les composants organiques sont des cellules spécialisées dans la fabrication de l'os.

Les composants inorganiques constituent 65 % de la masse de l'os. Son composant principal est un sel minéral de phosphate de calcium appelé hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$). On étudie la proportion de ^{18}O et de ^{16}O de l'oxygène associé au phosphate (P) de l'hydroxyapatite.

Le calcul de la température d'incubation est basé sur les considérations suivantes :

La composition isotopique de l'oxygène de la coquille d'œuf reflète la composition isotopique de l'oxygène des fluides corporels de la femelle à partir desquels la coquille

d'œuf précipite. Étant donné que l'eau des fluides de l'œuf provient de l'eau corporelle de la femelle et est transmise sans fractionnement isotopique, les valeurs isotopiques de la coquille reflètent également indirectement les compositions isotopiques de l'oxygène des fluides de l'œuf.

Les os des embryons se forment à partir des fluides de l'œuf, avec un fractionnement isotopique influencé par la température de

l'œuf. Pour cela, nous avons utilisé une modélisation qui a permis de prédire l'évolution de la composition isotopique de l'oxygène du squelette des embryons pendant que le dinosaure couvait les œufs, en tenant compte de leurs températures respectives. Les valeurs mesurées de $\delta^{18}\text{O}$ de la coquille d'œuf et des os des embryons ont été utilisées comme **conditions limites*** pour cette modélisation.

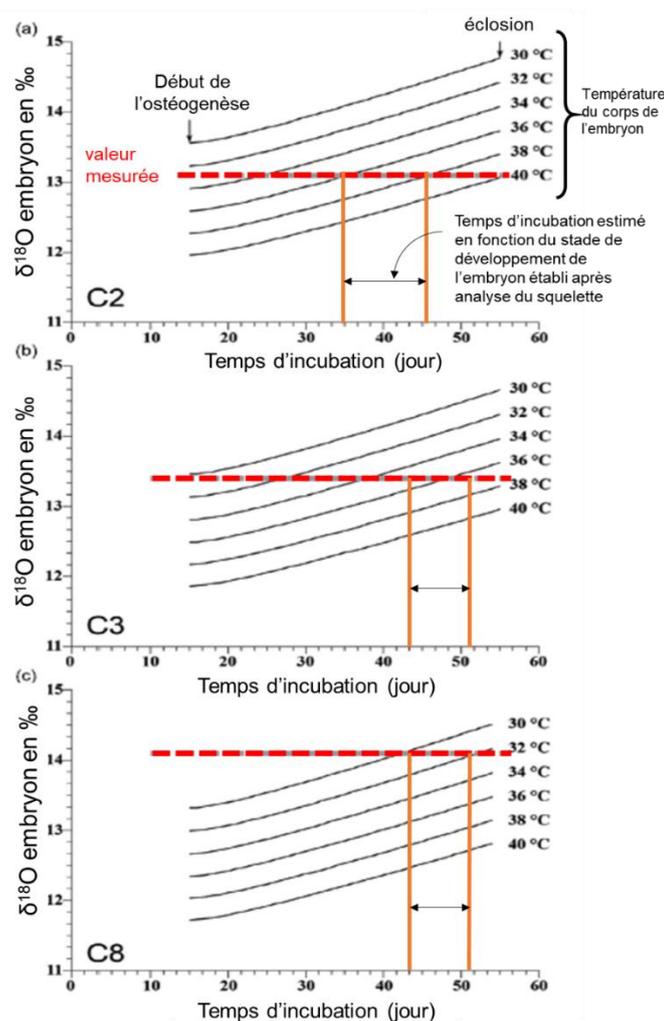


Figure. 7 : Résultats du modèle prédisant l'évolution dans le temps de la température d'incubation (en s'aidant du rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$) (modifié de Bi et al., 2021). Comparaison des valeurs du modèle (ligne noire) avec les valeurs mesurées pour les œufs C2 (a), C3 (b) et C8 (c) à un stade de développement inconnu (ligne pointillée grise), dans une fourchette de 30 à 40°C. Compte tenu de l'ossification avancée des squelettes embryonnaires

dans C2, C3 et C8, ils pourraient correspondre aux derniers jours ou semaines de leur période d'incubation où les valeurs mesurées de $\delta^{18}O_p$ croisent les lignes modélisées de 36 et 38 °C pour C2, environ 35 à 37 °C pour C3, et 30 à 32 °C pour C8.

Ainsi, l'analyse isotopique montre que des différences de température existaient entre les œufs. Leur température pouvait varier de 30°C à 40°C. Les dinosaures non aviens avaient des températures corporelles élevées situées entre 33–38 °C. Deux des trois œufs

analysés et couvés se situent bien dans la gamme de température attendue d'une couvaison (36–38 °C), tandis que le troisième embryon a été incubé à une température plus basse de 30–32 °C mais toujours dans la gamme des températures de couvaison.

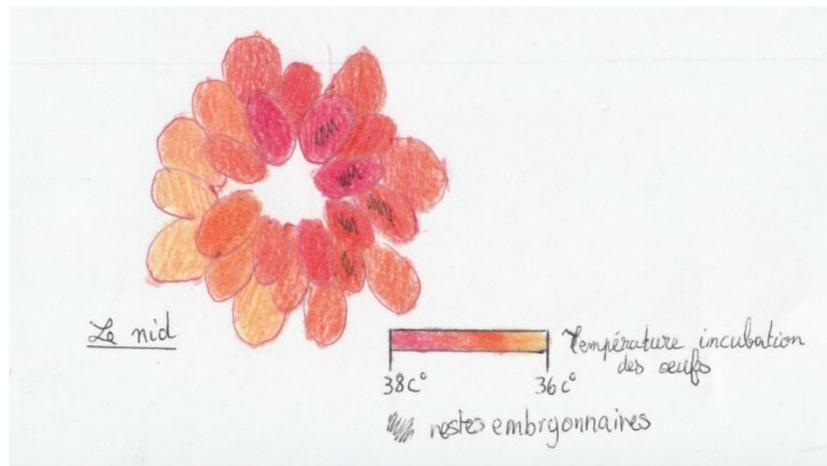


Figure 8 : Schématisation des résultats obtenus, réalisé par Penda, Ambre et Marion ©

Cette température inférieure calculée pourrait être le résultat d'une partie de la ponte qui aurait été moins couverte par le corps de l'adulte et donc avoir été soumise à une température plus basse.

On suppose que le stade de l'embryon dans l'œuf C8 serait légèrement plus précoce par rapport à ceux dans C2 ou C3. La température d'incubation plus basse à laquelle cet œuf a été soumis, a très certainement affecté la vitesse de développement embryonnaire et donc sa durée.

IV Discussion

Le fossile LDNHMF2008 représente le

premier spécimen de dinosaure non avien à conserver en association un adulte au sommet d'un nid d'œufs contenant des embryons. Étant donné que les embryons sont morts à des stades de développement avancés, l'adulte a clairement pris soin du nid pendant une période prolongée et n'est pas mort en pondant ses œufs, contrairement à ce qui a été suggéré précédemment pour d'autres découvertes.

La température d'incubation estimée des œufs est cohérente avec une température corporelle d'oiseaux couveurs. En revanche, la température d'incubation des reptiles est toujours plus basse. Dans l'ensemble, la combinaison entre contact étroit entre le squelette adulte et les œufs, les stades de développement avancés des embryons et la température d'incubation estimée élevée



exclut à la fois l'hypothèse de la mort de l'adulte pendant la ponte et celle de garde du nid sans couvaion comme cela est observé chez les reptiles actuels. Ces éléments soutiennent fortement l'hypothèse de couvaion pour les spécimens associant des oviraptorosaures (dinosaures proches des oiseaux) adultes à leurs pontes.

Des études précédentes démontrent que l'évolution de la reproduction des oiseaux modernes s'est produite en plusieurs étapes, et certaines caractéristiques de reproduction des oiseaux trouvent leurs origines au sein des théropodes non aviens, alors que d'autres caractéristiques ont évolué parmi les oiseaux primitifs. Les maniraptoriniens du grade des oviraptorosaures représentent un stade intermédiaire dans l'évolution de la biologie de reproduction des oiseaux modernes, car la communauté scientifique considère qu'ils possèdent des caractéristiques telles que pondre en plusieurs fois, peut-être une pratique de couvaion paternelle pour aider à l'incubation dans un nid partiellement ouvert, et l'éclosion en même temps des œufs via une incubation retardée. Les découvertes rapportées ici soutiennent la présence de certaines (par exemple, la ponte en plusieurs fois et le comportement de couvaion paternelle) mais pas toutes (par exemple, l'éclosion en même temps des œufs) de ces caractéristiques chez les oviraptorosaures.

Chez la plupart des oiseaux actuels **nidifuges***, les embryons d'une même couvée se développent et éclosent en même temps, ou presque. L'éclosion synchrone est une caractéristique ancestrale (**plésiomorphique***) pour les oiseaux du **groupe couronne*** et les autres vertébrés. En même temps les oiseaux **nidicoles*** sont caractérisés par une éclosion asynchrone, une caractéristique dérivée du groupe couronne. LDNHMF2008 présente un développement

en une seule couvée. La différence de maturité développementale entre les œufs renforce l'idée que l'éclosion asynchrone aurait pu exister chez les théropodes non aviens. L'éclosion asynchrone est due à la différence de température entre les œufs/embryons au sein d'une seule couvée. Cependant, on ne peut pas exclure complètement que des échecs de développement de certains œufs pourraient avoir entraîné l'apparente variation des différents stades de développement embryonnaire observée dans la couvée.

En raison de la complexité des données sur LDNHMF2008 il a été impossible d'établir un schéma explicatif du développement des embryons donc nous ne sommes pas capables d'expliquer la cause de l'éclosion **asynchrone***. Néanmoins il est possible de proposer une théorie avec les données disponibles sur l'éclosion asynchrone chez les oviraptorosaures semblable. Comme chez les autruches, les oviraptorosaures commencent l'**incubation*** des œufs une fois tous les œufs pondus.

Ainsi les œufs situés au niveau inférieur (le plus bas) et donc pondus en premier auraient eu un temps d'incubation proportionnellement équivalent aux œufs supérieurs, pondus plus tardivement.

Toutefois, les œufs supérieurs auraient éclos avant les œufs inférieurs vu qu'ils étaient plus proches du couveur. En effet, la température de couvaion étant plus élevée cela aurait accéléré le développement des embryons à l'intérieur. Du fait de cette distance variable entre les différents cercles d'œufs pondus, on peut supposer que les œufs auraient pu éclore à des moments différents.

La découverte de l'éclosion asynchrone chez les oviraptorosaures est inattendue compte tenu de son apparition tardive même parmi les oiseaux du groupe couronne. Apparemment, cette caractéristique a évolué





indépendamment chez certains oiseaux du groupe couronne et au moins chez les oviraptorosauriens parmi les dinosaures non aviens, renforçant les hypothèses précédentes selon lesquelles l'évolution de la biologie de reproduction des oiseaux modernes n'était pas un processus linéaire. Au contraire, l'évolution indépendante de l'éclosion asynchrone chez un théropode non avien proche des oiseaux fournit un autre exemple de l'apparition d'un caractère non hérité d'un ancêtre commun à travers cette importante transition évolutive. Cette découverte met en lumière la complexité de l'évolution et la diversité des trajectoires évolutives possibles.

Les théropodes non aviens n'étaient pas, d'un point de vue comportemental, strictement intermédiaires entre les oiseaux et les autres archosaures, soulignant davantage l'unicité des différents sous-groupes de dinosaures non aviens. Enfin, le scénario que nous proposons pour l'éclosion des oviraptorosaures n'est pas entièrement cohérent avec les données des oiseaux actuels. Ils affichent normalement une éclosion synchrone si l'incubation commence après que tous les œufs d'une couvée ont été pondus. Cela met en évidence d'avantage les comportements complexes des dinosaures non aviens en tant que groupe d'animaux ayant une histoire évolutive propre et unique.

LEXIQUE :

Asynchrone : qui n'est pas en même temps

Aviens : qui a des traits semblables aux oiseaux

Caenagnathidae : famille de dinosaures ressemblant à des oiseaux. Ils sont éteints et vivaient en Amérique du Nord et en Asie au Crétacé.

Conditions limites : Données le plus souvent mesurées qui permettent de limiter la modélisation à des résultats réalistes.

Crétacé : Qui correspond à une période de la fin de l'Ere Mésozoïque entre -145 et -66 millions d'années.

Éclosion : ouverture à maturité d'une enveloppe protectrice contenant un être vivant

Gastrialium : plaques osseuses dermiques des reptiles. Les **gastralia** (singulier *gastralium*) sont des plaques osseuses dermiques des reptiles comme les crocodiliens, les Sphenodons, les squamates, les dinosaures et d'une certaine manière, les tortues¹. On trouve ces plastrons ventraux chez l'archéoptéryx, mais pas chez les oiseaux actuels. Ces plaques de protection soutiennent les viscères et sont un pendant à la cage thoracique. Elles jouent donc un rôle dans la respiration. Elles peuvent également protéger les viscères des animaux qui en sont pourvus s'ils marchent en rampant sur le sol.

Groupe couronne : petit clade formé par le dernier ancêtre commun.

Humérus : os situé dans le bras, entre l'épaule et le coude

Incubation : action de couvrir des œufs

Nidicole : jeune qui reste au près du parent pour être nourri pendant les premières semaines

Nidifuges : les jeunes oiseaux qui quittent le nid après l'éclosion

Oiseaux nidicoles : Une espèce animale est dite nidicole ou altricielle lorsque ses petits naissent incapables de se nourrir et de se déplacer seuls. Généralement ils naissent nus et aveugles. C'est le cas notamment des pigeons et de nombreux passereaux.

Ontogénique : Se dit des différents stades du développement d'un être vivant depuis sa





conception jusqu'à l'état adulte

Oviraptorosaures : dinosaures à plumes, semblables aux oiseaux, qui vivaient en Amérique du Nord et en Asie.

Phylogénie : l'étude des liens de parenté entre les êtres vivants et ceux qui ont disparu.

Plésiomorphe : état ancestral du caractère biologique étudié.

Pleurocèle : Chez les dinosaures, dépressions ou cavités aériennes trouvées dans certains os, notamment les vertèbres, de certains dinosaures et qui auraient pu jouer un rôle analogue aux sacs aériens des oiseaux actuels

Synchrone : qui se réalise en même temps

Théropodes : Dinosaures appartenant au groupe de saurischiens, bipèdes et pour certains carnivores, aux membres antérieurs courts mais pourvus de griffes, aux membres postérieurs adaptés à la course.

Référence :

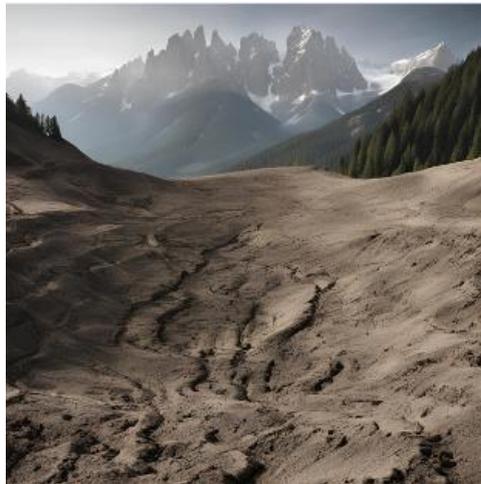
Bi, S., Amiot, R., Peyre de Fabrègues, C., Pittman, M., Lamanna, M. C., Yu, Y., Yu, C., Yang, T., Zhang, S., Zhao, Q., & Xu, X. (2021). An oviraptorid preserved atop an embryo-bearing egg clutch sheds light on the reproductive biology of non-avian theropod dinosaurs. *Science Bulletin*, 66(9), 947-954. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.12.018>

Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration avec Romain Amiot, chercheur en paléontologie (par ordre alphabétique) : AATOUT Najib, ABDELADIM Mahera, ABDESSELEM Iheb-Israfil, AISSA Aya, AOUANI Ayoub, AUDEL Yla, AYOUAZ Hafsa, AZOUAOU Aimad, BOUHADJELA Camelia, BOULEMAIZET Mehedine, BOULENDJAS Méliha, BOUTCHICHA Kays, BRESSET--MORRY Ambre, BUTTAY Marion, DEBBAH Morjane, DELAVALD--BURNAZ Marius, FAYE Penda, FRAHTI Waris, GERIN GUERICHE Faustine, LE JEUNE Paul, LETIFI Djihane, MECHERI Sarah, MHADHBI Wael, MOKDAD Noham, MOREIRA LEAL Ana, MOREL Arthur, MUKWABANGO Cynthia, OUKADIR Sara, OZCAN Elif, POZZI Ornella, SEFIANE Amani, SMAIL Samy, SWOROWSKI Samuel, TEZO AKUE Anne Laurie

Comment citer cet article : Romain Amiot et la 2nde 9 du lycée Pierre Brossolette (Villeurbanne, FR), *Les dinosaures couvaient-ils leurs œufs ?* Journal DECODER, 2024-06-27



Évaluation quantitative de l'effet des activités humaines et du climat sur l'érosion de la Zone Critique alpine au cours des 2000 dernières années



Réalisée sous IA, canva

William Rapuc¹ (chercheur) et la classe de 3^{ème} C du collège Olympe de Gougues de Mme Laetitia Legrand² (*la liste des élèves est aussi mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article: Rapuc, William, Julien Bouchez, Pierre Sabatier, Kim Genuite, Jérôme Poulernard, Jérôme Gaillardet, et Fabien Arnaud. « Quantitative evaluation of human and climate forcing on erosion in the alpine Critical Zone over the last 2000 years ». *Quaternary Science Reviews* 268 (15 septembre 2021): 107127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107127>.

Institution : ¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

² Collège Olympe de Gougues de Cadaujac, 250 Chemin du château, 33140 Cadaujac

Résumé :

L'érosion correspond à l'ensemble des processus externes qui, à la surface de la Terre, vont retirer des éléments existants (minéraux, ions, ...) et ainsi modifier le relief. En modifiant la surface de la Terre, et par conséquent les sols, c'est tout l'équilibre environnemental qui est impacté. En effet, les sols, fortement impactés par les activités humaines et le changement climatique sont nécessaires à l'Homme pour sa survie, ses activités.

Qui de l'action humaine ou du climat prédomine dans cette érosion ? Il est important de le savoir, de pouvoir le quantifier dans un contexte de plus en plus marqué par le changement climatique mais aussi par les activités humaines impactant les sols (agriculture intensive,

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



déforestation, ...). C'est pourquoi, nous nous intéressons à cette zone critique, environnement hétérogène, fragile et proche de la surface où des interactions complexes impliquant la roche, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent l'habitat naturel et déterminent la disponibilité des ressources biologiques.

Les zones montagneuses sont les zones les plus sujettes à l'érosion. Dans ces zones, il est ainsi nécessaire d'utiliser des études à grande échelle spatiale et temporelle pour déterminer le rôle de ces différents forçages et estimer leurs parts respectives dans l'érosion.

C'est ce que propose cette étude. Pour reconstruire l'érosion à long terme sur le bassin versant du lac Iséo, l'un des grands des Alpes européennes, les sédiments du lac Iséo ont été étudiés. Ce lac collecte, en effet, les produits de l'érosion de ce bassin versant de 1777 km².

Pourquoi ce choix du lac Iséo ? Car d'une part, le bassin versant d'où proviennent les sédiments étudiés, est représentatif des Alpes italiennes méridionales, où l'activité humaine et les fluctuations climatiques de l'Holocène sont bien connues. Mais aussi car dans ce bassin-versant, les sédiments proviennent de trois types principaux de roches et qu'il est possible de faire la part entre leurs différentes origines. Certains proviennent de la zone de haute altitude du bassin versant d'Iseo, où les avancées et les reculs des glaciers sont la seule cause d'érosion. D'autres sont issus de la partie inférieure du bassin versant, où cette fois l'érosion est influencée au cours du temps à la fois par les activités humaines et les précipitations.

Cette méthode associe la géochimie isotopique (ϵNd , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) selon une méthode source-puits à une analyse multi-proxy des sédiments lacustres sur une période de 2000 ans.

Une analyse multi-proxy est une approche permettant d'étudier les changements passés dans les systèmes naturels. Dans cette approche, plusieurs types de données ou de "proxies" sont utilisés pour reconstruire les conditions environnementales passées. Ces proxies peuvent inclure des éléments tels que des isotopes, des marqueurs chimiques, des fossiles, des données géomorphologiques, des données climatiques, etc.

Ici, on observe que, selon la provenance des sédiments (zone haute ou basse du bassin versant), les signatures isotopiques ne seront pas les mêmes. Ceci a tout d'abord permis de reconstituer l'histoire de l'érosion glaciaire sur les 2000 dernières années. Après avoir évalué l'évolution climatique, c'est le processus d'érosion des roches sédimentaires qui a été étudié pour comprendre l'impact des activités humaines.

Grâce à de nombreuses archives provenant d'études précédentes, nous avons pu apprendre que, de la période romaine à l'ère industrielle, plusieurs périodes de déforestation et de pression humaine importante ont existé dans la région. Il ressort ainsi, que la charge sédimentaire passée provenant de la zone des roches sédimentaires, présente les valeurs les plus élevées ($> 80 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) lors des périodes de pratiques humaines intenses.

Depuis la fin de l'ère romaine, les activités humaines semblent ainsi être le principal moteur de l'érosion physique dans les régions montagneuses du nord de l'Italie. Cette étude représente la première tentative de reconstitution temporelle de l'évolution de l'érosion à partir de sédiments lacustres, en identifiant les sources de ces sédiments et en évaluant quantitativement les facteurs d'érosion dans la zone critique.

Mots clés : Érosion, Impact des activités humaine, sédiments de lac, approche source-puits, modèle de mélange isotopique



I Introduction

L'érosion, au fil du temps, affecte, par exemple, le relief, mais aussi le climat de la Terre, faisant de ce processus un élément géologique significatif. (e.g., (Gayer et al., 2019) et les références qui s'y trouvent).

L'érosion est le facteur numéro un de la dégradation de la zone critique. La zone critique pouvant être définie comme étant cet environnement hétérogène, fragile et proche de la surface où des interactions complexes impliquant la roche, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent l'habitat naturel et déterminent la disponibilité des ressources biologiques.

Parmi ses nombreux effets, l'érosion dégrade les sols. Cela a des répercussions sur la production alimentaire, la qualité de l'eau potable, les services écosystémiques, la biodiversité et les réserves de carbone du sol (e.g., (Bosco et al., 2008; Panagos et al., 2015)). En effet, les sols constituent le puits de CO₂ le plus efficace à la surface de la Terre.

En raison de ses multiples impacts et de la menace que cela fait peser sur nos sociétés, les Nations Unies et l'Europe ont décidé de demander une évaluation quantitative de la perte de sol sur de grandes échelles spatiales et temporelles (e.g., (Panagos et al., 2015) et les références qui s'y trouvent).

Pourquoi une telle demande ? Parce qu'il est primordial de mieux comprendre les effets des principaux facteurs qui influent sur l'érosion. En particulier, le climat (comme les précipitations et les mouvements des glaciers) et les activités humaines (comme l'exploitation des sols et la gestion des forêts) qui ont été identifiés comme des facteurs clés dans les changements à long terme des taux d'érosion (e.g., (Panagos et al., 2015)).

Comment progresser et acquérir de nouvelles connaissances pour mieux appréhender ces phénomènes ? Plusieurs

approches sont possibles : d'une part les modélisations mais aussi l'étude des archives disponibles. Et parmi ces archives, nous avons celles constituées par les sédiments lacustres. En effet, les sédiments lacustres sont utiles, notamment pour évaluer les taux d'érosion sur des échelles de temps centenaires à millénaires, où les influences climatiques et humaines sont les plus probables en tant que moteurs de l'érosion.

A ces échelles de temps, nous disposons de synthèses régionales en particulier pour les Alpes européennes (e.g., (Hinderer et al., 2013) et les références qui s'y trouvent), mais il existe seulement quelques études ayant produit une évaluation quantitative des taux d'érosion dans le temps (e.g., (Bajard et al., 2020), et aucune n'ayant permis de quantifier l'effet des différents facteurs.

L'approche "source-puits" (e.g., (Collins & Walling, 2002) permet de tracer l'origine des sédiments provenant de différentes zones géographiques ou types de roches vers une destination, comme un lac, au fil du temps. On les suit ainsi de la source (provenance) vers le puits (destination finale). Cela permet de mieux comprendre l'impact du climat et des activités humaines sur l'érosion, à condition que chaque source de sédiments soit impactée par les différents facteurs de manière distincte.

Pour cette étude, nous avons choisi le lac Iseo, dans les Alpes italiennes, à l'aval de la vallée du Val Camonica, une région où les activités humaines depuis le début de l'ère néolithique sont bien enregistrées (e.g., Pini et al., 2016 et les références citées). Le lac Iseo reçoit les eaux d'un grand bassin versant qui peut être subdivisé en trois principales sources de sédiments, identifiables grâce à des outils géochimiques. Ces sources correspondent aux différents impacts relatifs des influences climatiques et humaines sur l'érosion sur des

échelles temporelles allant du siècle au millénaire.

Ainsi :

- (i) La partie au Nord-Est et de haute altitude du bassin versant, où ce sont l'impact des glaciers qui domine l'érosion avec de nombreux glaciers ayant façonné le paysage (Scotti et al., 2013);
- (ii) La partie du bassin versant située à moyenne altitude où l'érosion est mixte, les glaciers et les activités humaines ont eu un impact sur l'érosion (Pini et al., 2016; Scotti et al., 2013);

(iii) La partie la plus au sud, de faible à moyenne altitude, du bassin versant, qui est le siège de la plupart des activités humaines dans le Val Camonica depuis le début de l'Holocène tardif (Pini et al., 2016 et les références citées).

Nous avons étudié comment l'érosion a évolué dans le bassin du lac Iseo à la fin de l'Holocène. Pour ce faire, nous avons analysé des échantillons de sédiments prélevés dans le fond du lac, où la plupart des sédiments provenant du bassin versant sont accumulés (le puits par conséquent).

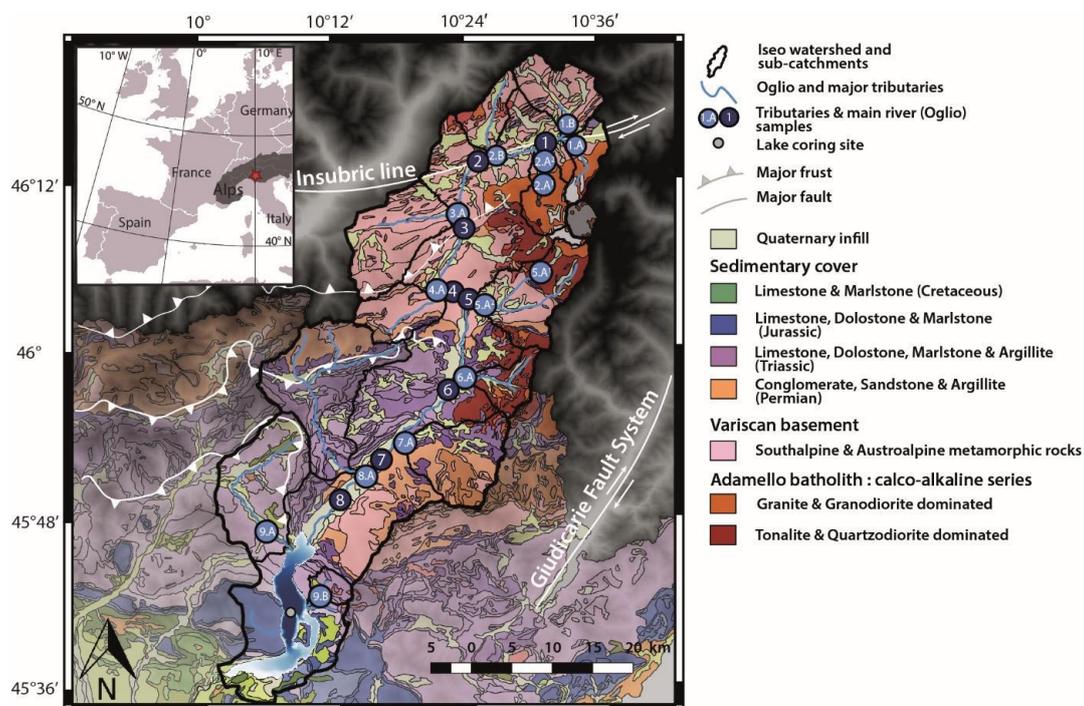


Figure 1 - Carte géologique de la zone d'étude, superposée à une carte en relief ombrée, et emplacement des sites d'échantillonnage. Les informations géologiques ont été modifiées à partir de la carte géologique de la Lombardie (projet CARG ; <https://www.cartografia.servizirl.it/cargviewer/>). Les affluents (en bleu) et les sous-bassins versants (limites en noir) de la rivière Oglio et le site de carottage des sédiments du lac SEB18 sont également représentés (cercle gris). La bathymétrie du lac Iseo est modifiée à partir de (Pilotti et al., 2013) et est disponible sur https://hydraulics.unibs.it/hydraulics/attivita-scientifica/laghi_pvbs/lake-iseo-data-set/. (Rapuc et al., 2021)



Nous avons également collecté des échantillons de rivières dans tous les sous-bassins versants qui alimentent directement le lac d'Iseo. En utilisant les compositions isotopiques du néodyme (Nd) et du strontium (Sr) ainsi que les concentrations de sédiments dans les rivières et le lac, nous avons utilisé un modèle de mélange pour comprendre la provenance des sédiments.

Ces résultats nous ont permis de quantifier la contribution de chaque source de sédiments, nous aidant ainsi à comprendre comment les variations climatiques et les activités humaines ont influencé l'érosion dans le bassin du lac Iseo depuis l'époque romaine jusqu'à aujourd'hui.

II Site d'étude

Le lac Iseo se trouve dans les Alpes italiennes, au sud de la vallée du Val Camonica, à une altitude de 185 mètres. Il mesure environ 25 kilomètres de long et couvre une superficie de près de 61 kilomètres carrés. Son principal affluent est la rivière Oglio, qui prend sa source dans le massif de l'Adamello.

Le bassin versant de l'Oglio, qui alimente le lac, est vaste, couvrant environ 1777 kilomètres carrés. Il présente une topographie montagneuse, avec une altitude maximale de 3539 mètres dans le massif de l'Adamello et une altitude moyenne de 1400 mètres (Garibaldi et al., 1999). (Fig. 1).

Les roches qui composent ce bassin versant varient, avec des formations métamorphiques au nord et à l'ouest, des roches sédimentaires au sud, et le massif de l'Adamello au nord-est, composé principalement de roches plutoniques (Chiesa et al., 2011 ; (Gosso et al., 2012).

En ce qui concerne l'occupation humaine, les activités humaines sont concentrées principalement près du lac, à des altitudes

basses à moyennes, avec des preuves d'implantations humaines remontant au Néolithique. Les activités agricoles et urbaines sont principalement concentrées dans cette région (e.g., (Marziani & Citterio, 1999; Pini, 2002; Pini et al., 2016). Dans les parties plus éloignées du bassin versant, telles que les régions montagneuses, les activités humaines sont moins importantes et se limitent principalement au pâturage du bétail (Pini et al., 2016).

III Matériels et Méthodes :

1 Les sédiments de lac :

En octobre 2018, a été prélevée une longue carotte de sédiments, appelée "SEB18", dans le fond profond du lac d'Iseo en Italie. Ce site a été choisi car il est moins perturbé par des événements soudains (crues et séismes) et recueille régulièrement les sédiments venant de la rivière Oglio (Bini et al., 2007).

Pour étudier ces sédiments, des équipements spéciaux ont été utilisés et nous avons pris des échantillons à différentes profondeurs. Nous avons ainsi prélevé trente échantillons de boue de 1 cm de long pour des analyses géochimiques. A également été mesurée la densité apparente sèche des sédiments et la proportion de silicates détritiques a aussi été évaluée. Pour dater avec précision la séquence de sédiment, nous avons combiné plusieurs méthodes, comme le comptage des varves avec la mesure des éléments radioactifs avec l'utilisation de radionucléides à courte durée de vie et le carbone 14.

Mais avant d'aller plus loin, quelques explications s'imposent. Le comptage des varves ? En quoi cela consiste-t-il ?

Le comptage des varves est une méthode utilisée pour estimer l'âge des sédiments lacustres ou glaciaires en comptant les couches de sédiments annuelles visibles dans



une carotte par exemple. Une varve est une fine couche de sédiments qui se dépose chaque année dans un environnement lacustre ou glaciaire. Elle est généralement composée de dépôts de matériaux fins comme la boue, l'argile ou le limon.

Ces varves se forment généralement en raison des variations saisonnières dans le processus de sédimentation. Par exemple, en été, lorsque la fonte des neiges et des glaciers augmente le débit des rivières, une plus grande quantité de sédiments est transportée vers le lac, ce qui conduit à la formation d'une varve plus épaisse. En revanche, en hiver, lorsque le débit des rivières diminue, la sédimentation est moins importante et une varve plus mince se forme. Notons que la couleur des varves peut aussi varier en fonction de la composition du sédiment, de sa richesse en matière organique, etc.

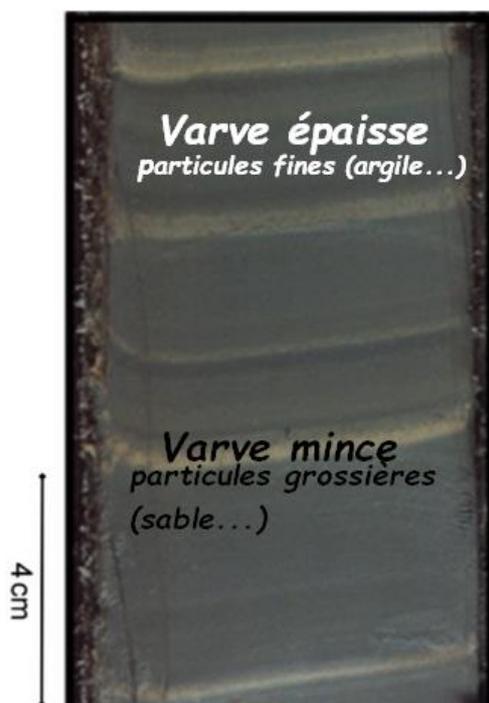


Fig 2 : exemple de varves d'une carotte prélevée dans le lac d'Annecy. D'après J.F. Deconinck 2016, *Paléoclimats : l'enregistrement des variations climatiques*.

En comptant le nombre de varves dans une séquence de sédiments, les scientifiques peuvent estimer l'âge de ces dépôts avec une certaine précision. Cette méthode permet ainsi de reconstruire l'histoire environnementale d'un site donné sur de longues périodes de temps, souvent sur des milliers d'années.

Quant à l'utilisation des isotopes radioactifs dont il sera souvent question dans la suite de cet article, cela consiste à détecter et à quantifier la présence de certains isotopes radioactifs dans les échantillons de sédiments ou de matériaux environnementaux. Les radionucléides à courte durée de vie sont des isotopes radioactifs qui se désintègrent rapidement en émettant des rayonnements, ce qui leur confère une courte demi-vie.

En mesurant la quantité de ces radionucléides dans les couches de sédiments, les scientifiques peuvent estimer l'âge des dépôts et reconstruire l'histoire environnementale du site étudié. Les radionucléides à courte durée de vie servent de marqueurs temporels pour établir une chronologie des événements passés, complétant ainsi d'autres méthodes de datation comme le comptage des varves ou l'analyse du carbone 14.

Grâce à toutes ces analyses, il est possible de reconstituer l'histoire environnementale du lac sur une longue période de temps.

2 Sédiments de rivière :

Pour comprendre d'où viennent les sédiments accumulés au fond du lac Iseo, des échantillons de sédiments ont été collectés en mai 2018. Ces échantillons ont été prélevés dans les zones où les rivières qui alimentent directement le lac se rejoignent avec la rivière principale, appelée l'Oglio, en amont de la confluence (Fig. 1). D'autres échantillons ont également été collectés un peu plus en aval de

ces points de jonction pour voir comment les sédiments se mélangent entre les différentes zones. Ainsi, la majorité des affluents ont été échantillonnés.

Pour cette collecte, il s'agit de prendre des échantillons de sédiments fins des zones de crue des rivières et de les passer à travers un tamis pour ne garder que la partie la plus fine (<63 µm). Cela était nécessaire car les sédiments dans le lac sont principalement constitués de limon et d'argile. Ces échantillons serviront à déterminer d'où viennent les sédiments qui se trouvent au fond du lac Iseo.

3 Préparation des échantillons :

Dans les régions où les sols sont principalement composés de carbonates, l'érosion est difficile à mesurer. Pour mieux étudier ce processus, l'étude s'est concentrée sur les matériaux silico-clastiques et la partie carbonatée des sédiments lacustres et fluviaux a été éliminée avant les analyses géochimiques (Ramisch et al., 1999). Cela garantit que les carbonates présents dans le lac n'influencent pas les conclusions.

Pour ce faire, il faut d'abord broyer les échantillons de sédiments et les sécher. Ensuite, il faut retirer les carbonates en les traitant avec de l'acide chlorhydrique (HCl). L'acide chlorhydrique a la particularité d'attaquer les carbonates, de les dissoudre. Puis a été mesurée la quantité de calcium (Ca) et de strontium (Sr) perdus lors de ce processus. Cependant, il est important de noter que cette méthode n'a pas pu éliminer complètement les carbonates, ce qui peut être dû à la présence de dolomite dans les sédiments.

A également été conservée une série d'échantillons de sédiments sans traitement acide pour mesurer les isotopes et les

concentrations en éléments majeurs et traces. Tous les échantillons, qu'ils aient été traités ou non, ont ensuite été dissous digérés à l'aide de mélanges d'acides concentrés pour pouvoir effectuer les analyses nécessaires.

4 Eléments majeurs et traces

Tout d'abord que sont les éléments majeurs et traces ?

Les éléments majeurs et traces sont des catégories utilisées en géochimie pour classer les éléments en fonction de leur abondance relative dans les roches, les minéraux...

Les éléments majeurs sont présents en quantités relativement élevées dans les échantillons géologiques et comprennent des éléments tels que l'oxygène (O), le silicium (Si), l'aluminium (Al), le fer (Fe), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le titane (Ti).

Ils sont souvent les principaux constituants des minéraux et des roches.

Quant aux éléments traces, ils sont présents en quantités beaucoup plus faibles dans les échantillons géologiques, généralement en parties par million (ppm) ou en parties par milliard (ppb).

Les éléments traces incluent des éléments tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le vanadium (V), le chrome (Cr), l'argent (Ag), le baryum (Ba), le strontium (Sr), le néodyme (Nd), etc.

Bien qu'ils soient présents en quantités infimes, ils jouent souvent des rôles importants dans la géologie, l'hydrologie, la métallurgie, et sont également utilisés comme indicateurs de processus géologiques et environnementaux.

Comment les a-t-on mesurés dans cette étude ? Pour mesurer les concentrations des éléments majeurs et des traces, un instrument appelé ICP-MS Agilent 7900, a été utilisé. Il



est capable de détecter des éléments présents en très petites quantités. Les échantillons liquides ont été transformés en fines particules puis vaporisés. Ensuite, ils ont été ionisés pour pouvoir être analysés.

Des éléments tels que le magnésium (Mg), le calcium (Ca) et le fer (Fe) ont été mesurés, en utilisant une méthode qui élimine les interférences qui pourraient fausser les résultats. Pour d'autres éléments comme le néodyme (Nd) et le strontium (Sr), il n'a pas été utile d'employer cette méthode spécifique.

Pour assurer la précision des mesures, des étalons sont utilisés. Ce sont des échantillons de référence de composition connue. A plusieurs reprises un échantillon de sol de référence a été également mesuré pour évaluer la justesse des mesures.

Les résultats ont été exprimés en prenant en compte la perte de poids due à l'élimination des carbonates des sédiments, de sorte que les concentrations rapportées se réfèrent uniquement à la partie silicatée des échantillons. Cela a permis d'obtenir des données précises sur les éléments présents dans les sédiments.

5 Composition isotopique

Pour comprendre la provenance des sédiments dans le bassin profond du lac Iseo, des mesures isotopiques ont été effectuées, à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). Les éléments strontium (Sr) et néodyme (Nd) ont été séparés de la matrice de l'échantillon à l'aide d'une technique appelée chromatographie d'extraction (Hajj et al., 2017).

Ensuite, avec un appareil appelé spectromètre de masse à plasma inductif multi-collecteur (MC-ICPMS) ont été mesurés les rapports isotopiques du Sr. Ce processus a nécessité des corrections pour éliminer les interférences de certains

éléments, comme le rubidium (Rb) et le krypton (Kr), qui peuvent fausser les résultats. L'exactitude des mesures a aussi été vérifiée en comparant les résultats avec des échantillons de référence de composition connue.

Pour les isotopes du néodyme, le MC-ICPMS a aussi été utilisé pour mesurer les rapports isotopiques. Les résultats ont été présentés sous forme de valeurs ϵ_{Nd} pour faciliter l'analyse. Encore une fois, l'exactitude des mesures a été vérifiée en les comparant avec des échantillons de référence (Caro et al., 2006).

Ces mesures isotopiques ont permis de mieux comprendre l'origine des sédiments dans le lac Iseo et d'évaluer leur composition de manière précise.

IV Résultats et interprétations

1 Sédiments de lacs :

Dans la séquence sédimentaire SEB18 du lac Iseo, la sédimentation continue représente près de 40% de l'accumulation totale de sédiments. Ces sédiments se composent principalement d'argile grise, qui se distingue visuellement des couches causées par des crues ou des séismes. Sur les 15,5 mètres de sédiments, on a identifié 146 de ces couches événementielles, qui représentent environ 60% des sédiments. La majorité des sédiments du bassin profond du lac Iseo sont des silicates détritiques, avec une faible quantité de matière organique et de carbonates.

Pour comprendre l'âge des différentes couches de sédiments, plusieurs méthodes ont été combinées, notamment le comptage de varves, les radionucléides à courte durée de vie et les datations au carbone 14. Ces techniques ont permis de retracer les variations de taux de sédimentation au fil des 2000 ans couverts par cette séquence



sédimentaire. Par exemple, il est possible d'identifier trois périodes d'augmentation progressive du taux de sédimentation entre 500 et 800 de notre Ere, entre 1000 et 1400 de notre Ere, et à partir de 1500 jusqu'à nos jours.

En ce qui concerne les isotopes du strontium (Sr) et du néodyme (Nd) dans les sédiments silico-clastiques du lac Iseo, on constate des variations significatives au fil du

temps. Le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a montré une augmentation marquée entre 97 et 1033 de notre Ere, suivie d'une diminution jusqu'à 1265 de notre Ere, puis des fluctuations relativement élevées jusqu'à aujourd'hui. Les valeurs de ϵNd sont restées relativement constantes, sauf pour deux périodes où elles ont présenté des variations significatives (Fig. 3).

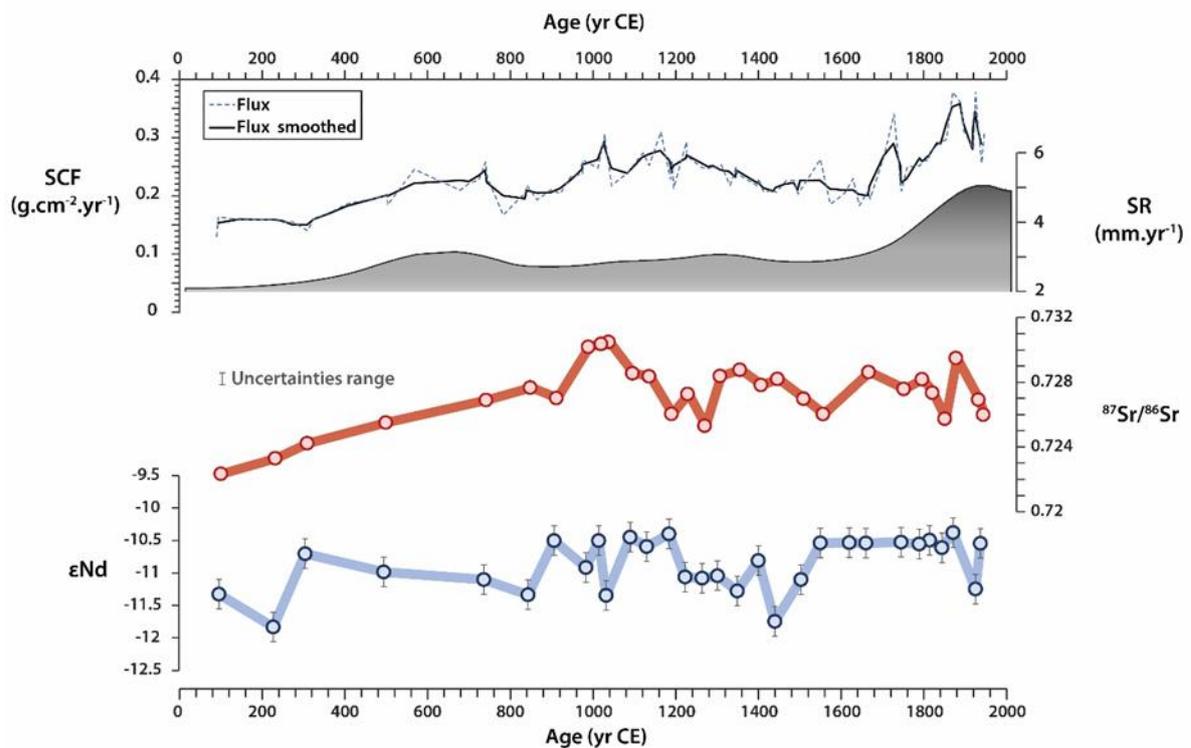


Figure 3 - Flux détritique de silicate (SCF, pour le flux silico clastique), taux de sédimentation (SR) et rapports isotopiques Sr et Nd du lac d'Iseo au cours des 2000 dernières années, obtenus à partir de la séquence de sédiments lacustres SEB18. Le flux silico clastique a été obtenu à partir d'analyses de la perte au feu, de la modélisation âge-profondeur et de mesures de la densité (supplément S1). Le taux de sédimentation a été obtenu à partir du modèle âge-profondeur (supplément S5). Les barres d'erreur sur les courbes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et ϵNd représentent les intervalles de confiance à 95% correspondant à l'incertitude analytique.

En résumé, l'analyse des sédiments du lac Iseo permet de reconstruire l'histoire environnementale de la région sur les 2000 dernières années, en mettant en évidence les changements dans la sédimentation et les variations isotopiques qui reflètent les processus géologiques et environnementaux survenus dans la région (Rapuc et al., 2021)

2 Sédiments de rivières :

Les sédiments prélevés dans les sous-bassins versants de l'Oglio présentent une variété de compositions isotopiques, indiquant une diversité de sources géologiques.

Les échantillons des bassins septentrionaux, qui sont principalement constitués de roches calco-alcalines comme

les tonalites et les granites, montrent des valeurs ϵ_{Nd} plus radiogéniques, reflétant leur origine dans des roches plus jeunes et riches en éléments radioactifs.

En revanche, les sous-bassins versants méridionaux, qui drainent des roches sédimentaires et métamorphiques, présentent des valeurs ϵ_{Nd} moins radiogéniques, indiquant une origine à partir de roches plus anciennes et moins radioactives.

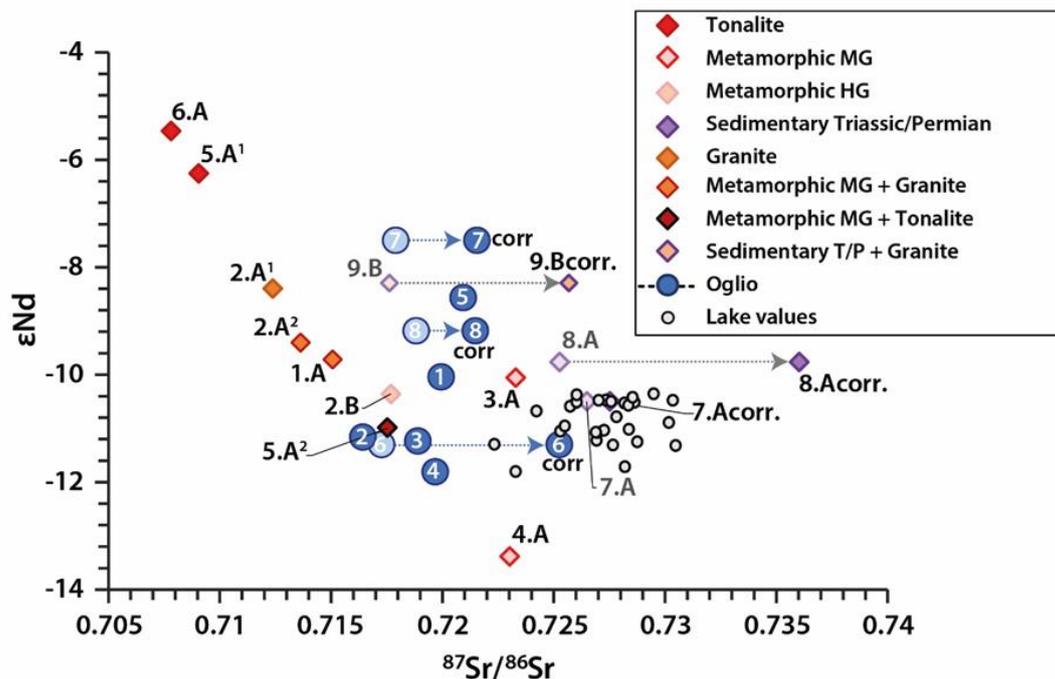


Figure 4 - Composition isotopique en Nd et Sr d'échantillons de sédiments silico clastiques du lac Iseo (petits cercles gris) et d'échantillons de sédiments fluviatiles provenant des sous-bassins versants de l'Oglio en amont du lac Iseo (diamants) et de la vallée principale de l'Oglio (grands cercles bleus). Les symboles des sous-bassins versants de l'Oglio (diamants) sont colorés en fonction des types de roches dominantes sous-jacentes au bassin versant. Les échantillons de sédiments de la vallée principale de l'Oglio (cercles bleus) sont numérotés comme dans les figures 2 et 3. Les flèches en pointillé représentent la correction de la contribution des carbonates effectuée pour les échantillons de rivière provenant de sous-bassins versants reposant sur du calcaire, comme le montrent les étapes de lixiviation acide douce (Rapuc et al., 2021)

Afin de mieux comprendre cette analyse, définissons rapidement ce qu'on appelle éléments radioactifs et radiogéniques.

Les éléments radioactifs sont des éléments

qui sont instables et se désintègrent spontanément en émettant des rayonnements (particules et/ou énergie).

Ils se transforment en d'autres éléments au



cours de ce processus.

Exemples : l'uranium-238, le carbone-14, le radon-222.

Les éléments radiogéniques sont les éléments qui sont produits par la désintégration des éléments radioactifs. Ils résultent du processus de désintégration et sont souvent stables.

Exemples : le plomb-206 (issu de la désintégration de l'uranium-238), l'azote-14 (issu de la désintégration du carbone-14).

En résumé : Les éléments radioactifs se désintègrent. Les éléments radiogéniques sont les produits stables de cette désintégration.

Les rapports isotopiques de strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) dans les sédiments fluviaux varient également en fonction des types de roches dominantes dans chaque sous-bassin versant.

Les bassins septentrionaux, caractérisés par des roches calco-alcalines, montrent des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus faibles, tandis que les bassins versants méridionaux, avec des roches métamorphiques et sédimentaires, présentent des valeurs plus élevées. Cependant, aucune des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sous-bassins versants ne correspond exactement aux valeurs les plus élevées observées dans les sédiments lacustres (Fig 4).

En résumé, l'analyse des isotopes ϵNd et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sédiments fluviaux suggère une diversité géologique significative dans les sources de ces sédiments, mais ne permet pas d'expliquer complètement les caractéristiques isotopiques spécifiques observées dans les sédiments lacustres du lac Iseo.

3 Interpréter les ratios isotopiques de Sr et Nd en termes de traçage des sources de sédiments

Deux hypothèses sont avancées avant de pouvoir interpréter les données isotopiques en strontium (Sr) et néodyme (Nd) du lac Iseo et de la rivière Oglio, concernant la contribution

des différentes sources de roches aux sédiments du lac :

Toutes les principales sources de sédiments ont été échantillonnées.

Les signatures isotopiques des différentes sources de roches sont restées constantes au fil du temps.

Étant donné que la composante carbonatée des sédiments a été éliminée, les signatures isotopiques Sr-Nd des échantillons du lac peuvent être interprétées comme un mélange des sources de silicates identifiées. Pour quantifier les contributions des sources de roches au fil du temps, les "pôles" du mélange doivent être identifiés et leurs signatures doivent être déterminées. Pour cela, des échantillons de sédiments provenant de sous-bassins versants présentant une lithologie homogène ont été sélectionnés.

Sur les 8 échantillons sélectionnés, trois sources principales ont été identifiées :

Roches calco-alcalines ("A")

Roches métamorphiques ("B")

Roches sédimentaires ("C")

Les sous-bassins versants drainant principalement des roches calco-alcalines ont été regroupés en une seule source de "roches calco-alcalines". Les sous-bassins versants dominés par des roches métamorphiques ont été regroupés dans la source "métamorphique", et ceux dominés par des roches sédimentaires ont été regroupés dans la source "roches sédimentaires".

Une fois les sources identifiées, une méthode de mélange a été utilisée pour estimer les contributions relatives de chaque source aux sédiments lacustres. Les compositions isotopiques en Sr et Nd des sédiments lacustres dépendent des concentrations et des signatures isotopiques de chaque source de roches, ainsi que de la proportion de chaque source contribuant au mélange.



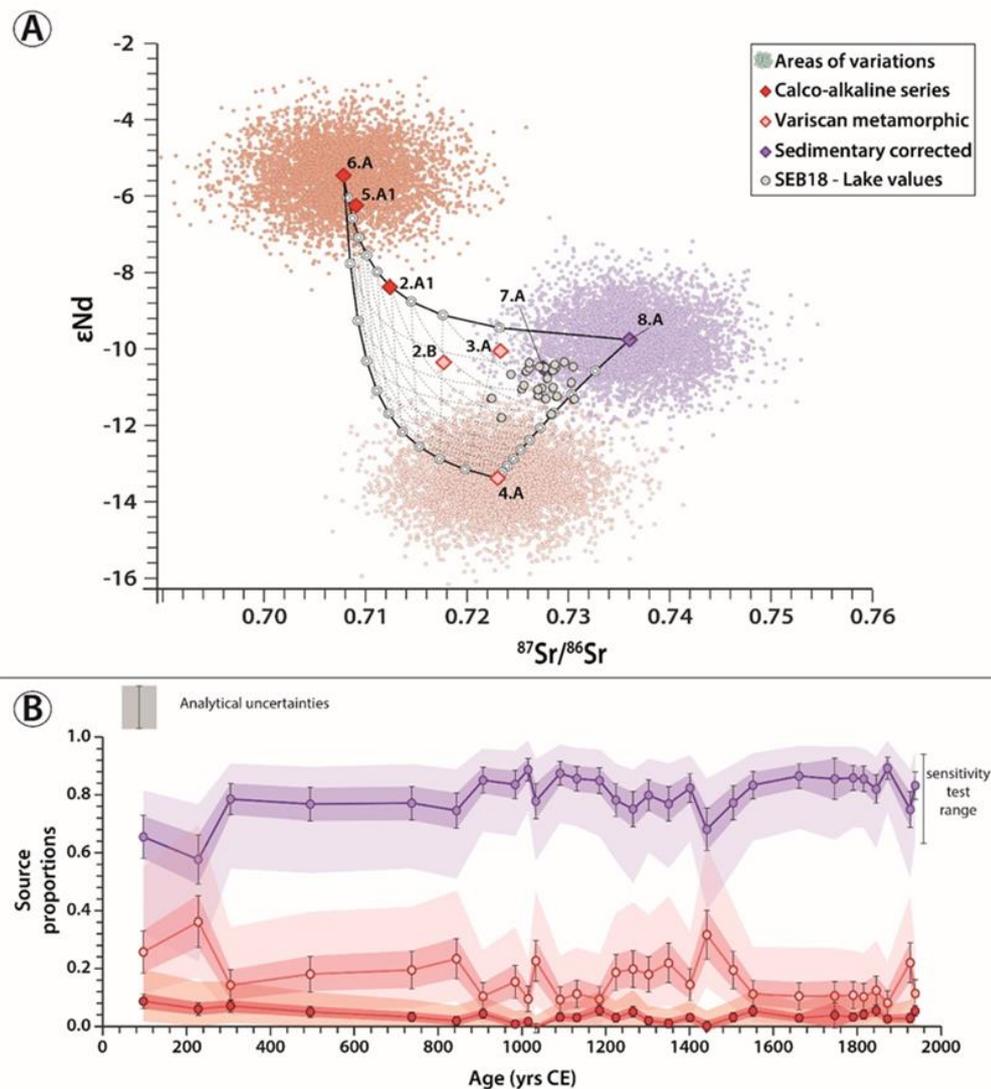


Figure 1 - Résultats du modèle de mélange. (A) Signatures isotopiques Nd-Sr des trois sources de roches identifiées, utilisées comme éléments finaux pour expliquer la composition des sédiments lacustres. Les échantillons 6.A, 8.A et 4.A sont utilisés pour contraindre la composition des éléments finaux des roches. Les sédiments lacustres sont représentés par des cercles gris à l'intérieur d'un réseau décrit par des hyperboles de mélange. Les symboles roses, rouges et violets correspondent à la composition de chaque itération de Monte Carlo utilisée pour le test de sensibilité. (B) Contributions fractionnelles de chaque source de roche aux sédiments du lac d'Iseo en fonction du temps (an CE). La propagation des incertitudes analytiques est représentée par des barres d'erreur et par des zones ombrées foncées, correspondant aux D84 et D16 de la distribution des paramètres obtenus à partir des simulations de Monte Carlo. Les zones ombrées claires représentent la propagation de l'incertitude associée à la composition des trois sources de roches, à nouveau avec les D84 et D16 de la distribution des paramètres obtenus à partir des simulations de Monte Carlo (Rapuc et al., 2021)



Les résultats montrent que la source "roches sédimentaires" est le principal contributeur aux sédiments du lac Iseo, avec une contribution moyenne d'environ 79,6 %. Les sources "roches métamorphiques" et "roches calco-alcalines" contribuent respectivement à environ 16,7 % et 3,5 % en moyenne (Fig. 5).

Des tests de sensibilité ont été réalisés pour évaluer l'impact des incertitudes sur les résultats, et ils confirment que la source "roches sédimentaires" reste le contributeur prédominant aux sédiments du lac Iseo.

En conclusion, cette approche de modélisation permet de mieux comprendre l'évolution de la contribution de chaque source de roche aux sédiments du lac Iseo au fil du temps, en tenant compte des incertitudes associées aux données isotopiques et géologiques.

4 Calcul de la charge sédimentaire :

Une fois que la proportion d'apports de chaque source de sédiments dans le lac a été calculée, on peut estimer les charges sédimentaires correspondantes pour évaluer les taux d'érosion à l'échelle du bassin versant.

Les sédiments dans les lacs comme celui d'Iseo sont composés de matériaux limoneux fluviaux et de dépôts authigènes. Peu ou pas de carbonates authigènes sont préservés dans le bassin profond du lac Iseo, ce qui en fait un bon indicateur de l'évolution de la charge sédimentaire des rivières au fil du temps et donc des taux d'érosion dans le bassin versant.

Le flux d'érosion du bassin versant au fil du temps est calculé à l'aide du calcul d'un flux silico-clastique (SCF) à partir des échantillons de sédiments lacustres. Ce flux dépend de la fraction de résidus d'ignition non carbonatés des sédiments lacustres (NCIR), du taux de sédimentation (SR) et de la densité apparente

sèche des échantillons (DBD).

La charge sédimentaire (SY) est définie comme la masse de sédiments qui quitte une limite, comme l'exutoire d'un bassin versant, sur une période donnée (Hinderer et al., 2013) et référence). Pour calculer la SY pour le bassin versant du lac Iseo, on estime la quantité totale de sédiments stockés dans le lac par unité de temps.

Ensuite, la contribution de chaque source de sédiments est prise en compte pour calculer l'évolution des charges sédimentaires spécifiques à chaque source (SL) au cours du temps. Ces valeurs sont normalisées par zone pour obtenir une valeur de charge sédimentaire normalisée par zone pour chaque source et une valeur totale pour l'ensemble du bassin versant.

Les résultats montrent que les taux d'érosion spécifiques des zones de roches sédimentaires et calco-alcalines dans le bassin versant d'Iseo ont des valeurs d'environ 100 et 10 tonnes par kilomètre carré et par an, respectivement. Ces valeurs sont cohérentes avec les estimations précédentes pour des contextes similaires et confirment les estimations des taux d'érosion au fil du temps pour le bassin versant du lac Iseo (Panagos et al., 2015).

V Discussion

Le taux d'érosion dans la région du Val Camonica, où se trouve le lac Iseo, a évolué au fil des siècles en réponse à divers facteurs climatiques et humains.

Pendant la période romaine, le taux d'érosion total était d'environ 20 tonnes par kilomètre carré et par an. Ce taux a presque doublé jusqu'à la période médiévale, atteignant entre 30 et 40 tonnes par kilomètre carré et par an. Ensuite, il a légèrement diminué jusqu'en 1661, avant de connaître une forte augmentation pendant l'ère industrielle



jusqu'à nos jours.

Sur des échelles de temps centennales à millénaires, l'érosion est principalement influencée par les changements climatiques, le couvert végétal et l'utilisation des terres, cette dernière étant associée aux activités humaines.

Pour étudier l'impact du climat et des activités humaines sur l'érosion, l'étude s'est concentrée sur les zones de basse et moyenne altitude d'une part et les zones de haute altitude d'autre part.

Ainsi, dans les zones de haute altitude, l'érosion est influencée par les avancées et les reculs des glaciers, ainsi que par les précipitations extrêmes. Les volumes des glaciers dépendent de la température estivale et des précipitations hivernales, toutes deux liées au climat méditerranéen (*e.g.*, (Fouinat et al., 2017; Glur et al., 2015; Holzhauser et al., 2005; Le Roy et al., 2015).

Le SYCalco-alcaline, qui reflète l'érosion dans ces zones, montre une corrélation avec

les fluctuations des glaciers (Fig.6). Les périodes plus froides ont tendance à augmenter l'érosion, tandis que les périodes plus chaudes ont un effet inverse.

À des altitudes plus basses, les fluctuations climatiques ne sont pas les seuls facteurs influençant l'érosion. Les activités humaines, telles que la déforestation pour l'exploitation minière et l'augmentation de la population, ont également un impact important (*e.g.*, (Bosco et al., 2008; Panagos et al., 2015).

Entre la période romaine et le Moyen Âge, l'effondrement du système de gestion forestière romain a entraîné une augmentation de l'érosion. Ainsi, on observe une augmentation du SRYoches sédimentaires. Celui-ci reflète l'érosion (Fig.6). L'hypothèse la plus probable est que celle-ci résulte de l'effet des activités humaines et de la disparition de la gestion du milieu forestier (Büntgen et al., 2011; Comiti, 2012; Joannin et al., 2014; Marziani & Citterio, 1999; Pini, 2002).

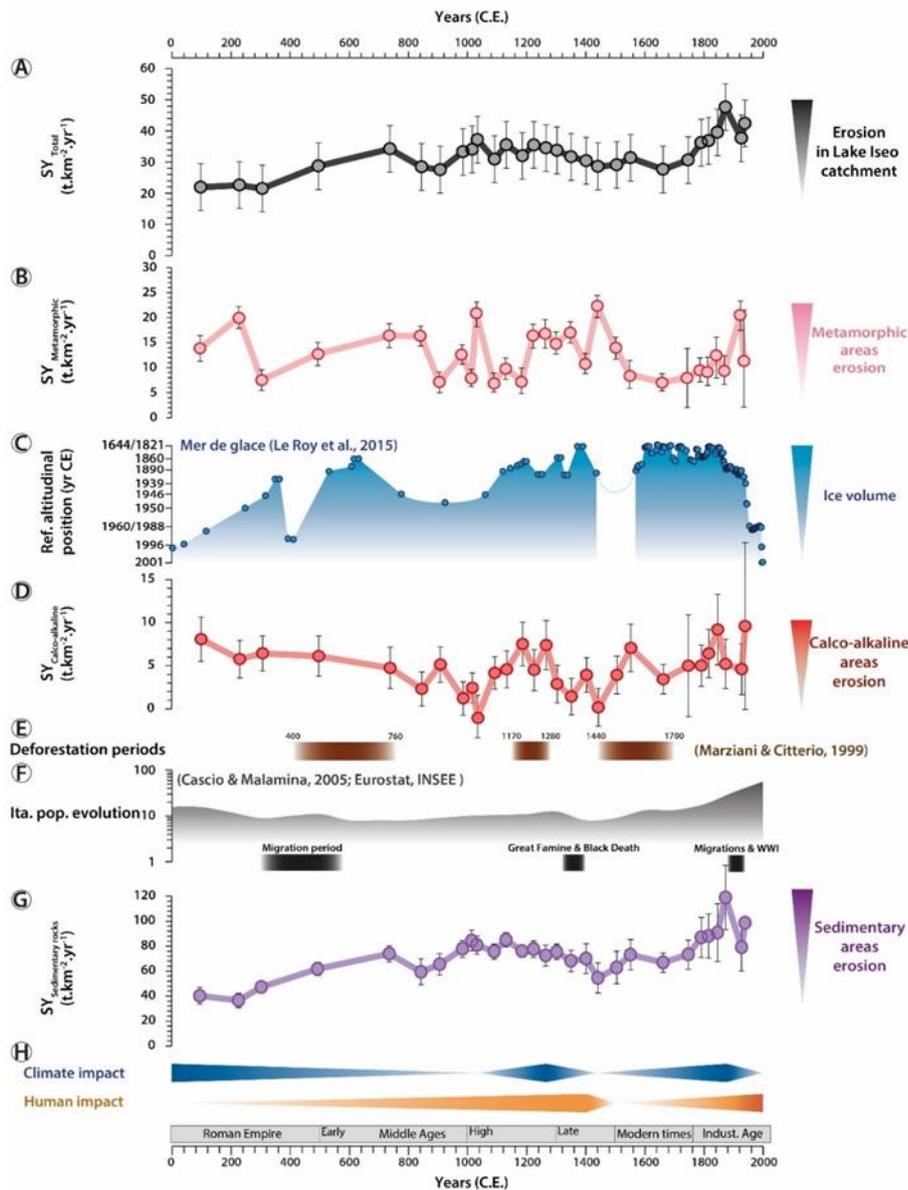


Figure 2 - Érosion dans le bassin versant du lac Iseo et évolution des facteurs de forçage au cours des 2000 dernières années. De haut en bas : (A) production totale (charge sédimentaire) de sédiments obtenue à partir de la carotte sédimentaire SEB18 (courbe noire) ; (B) production de sédiments provenant de l'érosion des zones métamorphiques dans le bassin versant du lac Iseo (courbe rose) ; (C) avancées et reculs du glacier Mer de Glace (Alpes françaises, 45° 54,9'N et 6° 56,2'E) modifiés d'après Le Roy et al. (2015 ; courbe ombrée en bleu) ; (D) la production de sédiments provenant de l'érosion des zones de roches calco-alkalines dans le bassin versant du lac Iseo (courbe rouge) ; (E) les périodes de déforestation attestées sur un site archéologique de moyenne altitude de la vallée du Val Camonica (Marziani & Citterio, 1999) ; ombres brunes) ; (F) l'évolution de la population italienne modifiée à partir de (Lo Cascio & Malanima, 2005) et de sources Eurostat et INSEE



(courbe ombrée en noir) ; les événements démographiques qui ont affecté la population italienne (ombres noires) ; (G) la production de sédiments provenant de l'érosion de la zone de "roche sédimentaire" dans le bassin versant du lac Iseo (courbe violette) ; (H) les périodes d'impact accru des activités climatiques (bleu) et humaines (orange) sur l'érosion du bassin versant du lac Iseo (Rapuc et al., 2021)

En résumé, l'érosion dans le bassin versant du lac Iseo a été influencée à la fois par le climat et par les activités humaines au fil des siècles. Les périodes de forte érosion sont souvent associées à des changements climatiques mais aussi à une intensification des activités humaines telles que la déforestation et l'exploitation minière. Comprendre ces facteurs est essentiel pour gérer efficacement les ressources naturelles et prévenir l'érosion future dans la région.

VI Conclusion

Les contributions des glaciers et des activités humaines à l'érosion ont été étudiées à partir d'une carotte de sédiments en utilisant un modèle de mélange basé sur la composition isotopique du strontium et du néodyme. La valeur absolue du signal de charge sédimentaire correspond bien aux travaux antérieurs et aux modèles d'érosion régionale, ce qui permet d'analyser ses variations par rapport aux trois principales sources.

Le signal d'érosion provenant des zones de haute altitude, qui est synchrone avec les principaux épisodes d'avancée et de recul des

glaciers européens, est interprété comme étant directement influencé par les fluctuations climatiques. En comparant les signaux d'érosion des zones de haute et de basse altitude, il a été possible de distinguer les principaux facteurs de forçage de l'érosion dans les zones de basse altitude.

Les activités humaines, telles que la déforestation, les pratiques agricoles et le pâturage, sont devenues les principaux facteurs de forçage affectant l'érosion entre la période romaine et le Moyen Âge, et de la fin du Moyen Âge à nos jours. Une multiplication par trois du taux d'érosion, passant de 36 à 118 tonnes par kilomètre carré et par an, a été observée dans les zones influencées par l'activité humaine.

Cette étude constitue la première évaluation quantitative de l'impact de l'activité humaine sur l'érosion à l'échelle d'un bassin versant dans le temps, basée sur des sédiments lacustres. Ces résultats devraient contribuer à améliorer la modélisation des impacts humains sur l'érosion de la zone critique et sur la diminution des stocks de carbone dans les sols.

Références :

Bajard, M., Poulénard, J., Sabatier, P., Bertrand, Y., Crouzet, C., Ficetola, G. F., Blanchet, C., Messenger, E., Giguet-Covex, C., & Gielly, L. (2020). Pastoralism increased vulnerability of a subalpine catchment to flood hazard through changing soil properties. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538, 109462.

Bini, A., Corbari, D., Falletti, P., Fassina, M., Perotti, C. R., & Piccin, A. (2007). Morphology and geological setting of Iseo Lake (Lombardy) through multibeam bathymetry and high-resolution seismic profiles. *Swiss Journal of Geosciences*, 100, 23-40.





Bosco, C., Rusco, E., Montanarella, L., & Oliveri, S. (2008). Soil erosion risk assessment in the alpine area according to the IPCC scenarios. *Threats to Soil Quality in Europe*, edited by: Toth, G., Montanarella, L., and Rusco, E., EUR, 23438, 47-58.

Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., & Wanner, H. (2011). 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *science*, 331(6017), 578-582.

Caro, G., Bourdon, B., Birk, J.-L., & Moorbath, S. (2006). High-precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measurements in terrestrial rocks : Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(1), 164-191.

Collins, A., & Walling, D. (2002). Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of hydrology*, 261(1-4), 218-244.

Comiti, F. (2012). How natural are Alpine mountain rivers ? Evidence from the Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(7), 693-707.

Fouinat, L., Sabatier, P., Poulénard, J., Etienne, D., Crouzet, C., Develle, A.-L., Doyen, E., Malet, E., Reyss, J.-L., & Sagot, C. (2017). One thousand seven hundred years of interaction between glacial activity and flood frequency in proglacial Lake Muzelle (western French Alps). *Quaternary Research*, 87(3), 407-422.

Garibaldi, L., Mezzanotte, V., Brizzio, M. C., Rogora, M., & Mosello, R. (1999). The trophic evolution of Lake Iseo as related to its holomixis. *Journal of limnology*, 58(1), 10-19.

Gayer, E., Michon, L., Louvat, P., & Gaillardet, J. (2019). Storm-induced precipitation variability control of long-term erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 517, 61-70.

Glur, L., Stalder, N. F., Wirth, S. B., Gilli, A., & Anselmetti, F. S. (2015). Alpine lacustrine varved record reveals summer temperature as main control of glacier fluctuations over the past 2250 years. *The Holocene*, 25(2), 280-287.

Gosso, G., Spalla, M., Siletto, G., Berra, F., Bini, A., & F. F. (2012). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 057—Malonno. In *I.S.P.R.A.: Vol. Regione Lombardia* (p. 220).

Hajj, F., Poszwa, A., Bouchez, J., & Guérol, F. (2017). Radiogenic and “stable” strontium isotopes in provenance studies : A review and first results on archaeological wood from shipwrecks. *Journal of Archaeological Science*, 86, 24-49.

Hinderer, M., Kastowski, M., Kamelger, A., Bartolini, C., & Schlunegger, F. (2013). River loads and modern denudation of the Alps—A review. *Earth-Science Reviews*, 118, 11-44.





Holzhauser, H., Magny, M., & Zumbuühl, H. J. (2005). Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15(6), 789-801.

Joannin, S., Magny, M., Peyron, O., Vannièrè, B., & Galop, D. (2014). Climate and land-use change during the late Holocene at Lake Ledro (southern Alps, Italy). *The Holocene*, 24(5), 591-602.

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., & Arnaud, F. (2015). Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial : The Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*, 108, 1-22.

Lo Cascio, E., & Malanima, P. (2005). Cycles and stability. Italian population before the demographic transition (225 BC-AD 1900). *Rivista di storia economica*, 21(3), 197-232.

Marziani, G., & Citterio, S. (1999). The effects of human impact on the arboreal vegetation near ancient iron smelting sites in Val Gabbia, northern Italy. *Vegetation history and archaeobotany*, 8, 225-229.

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>

Pilotti, M., Valerio, G., & Leoni, B. (2013). Data set for hydrodynamic lake model calibration : A deep prealpine case. *Water Resources Research*, 49(10), 7159-7163.

Pini, R. (2002). A high-resolution Late-Glacial – Holocene pollen diagram from Pian di Gembro (Central Alps, Northern Italy). *Vegetation History and Archaeobotany*, 11(4), 251-262. <https://doi.org/10.1007/s003340200038>

Pini, R., Ravazzi, C., Aceti, A., Castellano, L., Perego, R., Quirino, T., & Vallè, F. (2016). Ecological changes and human interaction in valcamonica, the rock art valley, since the last deglaciation. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 29(1), Article 1.

Ramisch, F., Dittrich, M., Mattenberger, C., Wehrli, B., & Wüest, A. (1999). Calcite dissolution in two deep eutrophic lakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19), 3349-3356. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00256-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00256-2)

Rapuc, W., Bouchez, J., Sabatier, P., Genuite, K., Poulenard, J., Gaillardet, J., & Arnaud, F. (2021). Quantitative evaluation of human and climate forcing on erosion in the alpine Critical Zone over the last 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 268, 107127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107127>

Scotti, R., Brardinoni, F., Alberti, S., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2013). A regional inventory





of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps. *Geomorphology*, 186, 136-149.

Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration avec William Rapuc, chercheur en sédimentologie/géochimie (par ordre alphabétique) : BARRIET Cassie, BLIN Olyvier, CALVEZ Léa, CASTAY Camille, COUSSAU Lya, FILARETOS Lukas, FONTAINE BASSET Océana, FREY Lilou, HAUTIER Samuel, LANDREAU-BRETON Léo, LESUEUR Mathys, MARTELETTI Nino, MOREAU Tom, ROJO Y ARIAS Onélia, WEISSMANN-FARBOS Gaël.

Comment citer cet article : William Rapuc et la 3^{ème} C du collège Olympe de Gouges (Cadaujac, FR), *Évaluation quantitative de l'effet des activités humaines et du climat sur l'érosion de la Zone Critique alpine au cours des 2000 dernières années*, Journal DECODER, 2024-07-28



Le passé de Mars : propice à la vie ?

Co-auteurs : Sylvain Bouley, Professeur des universités - GEOPS - Géosciences Paris Sud, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France. Élèves de 4ème du club science 2023-2024, Belinda Bastien, Yrfan Chanfi Mari, Luna Gallois, Lilian Giraud, Cameron Gombauld, Laurine Janez, Mathieu Lacour, Clément Riotte, Zachary Roche, Maël Simonet, Enzo Villatte, Isis Zanetti - Collège Marguerite Audoux, Sancoins. DÉCODER - Journal de vulgarisation scientifique.

Introduction

La Terre et Mars (Fig. 1) sont deux planètes rocheuses voisines et toutes deux situées dans la zone habitable du système solaire.

Pourtant, ces deux planètes sont très différentes. Alors que la Terre possède une grande quantité d'eau liquide sur sa surface et qu'elle regorge de vie, Mars paraît être un désert rouge inhabité. Pourtant, dans son lointain passé, cette planète rouge était probablement aussi bleue que la Terre puisque de l'eau en grande quantité était présente sur sa surface.

Mais alors, où est passée toute cette eau ? Est-il possible que la vie soit apparue un jour sur Mars ?

1. L'eau dans tous ses états

La présence d'eau à l'état liquide est l'une des conditions nécessaires pour que la vie telle que nous la connaissons se développe. Les scientifiques affirment en effet que les premières formes de vie sur Terre sont apparues dans l'eau il y a environ 3,2 milliards d'années. Or, l'eau ne peut exister à l'état liquide que pour certaines pressions et températures comme le montre le diagramme de phase de l'eau (Fig. 2).

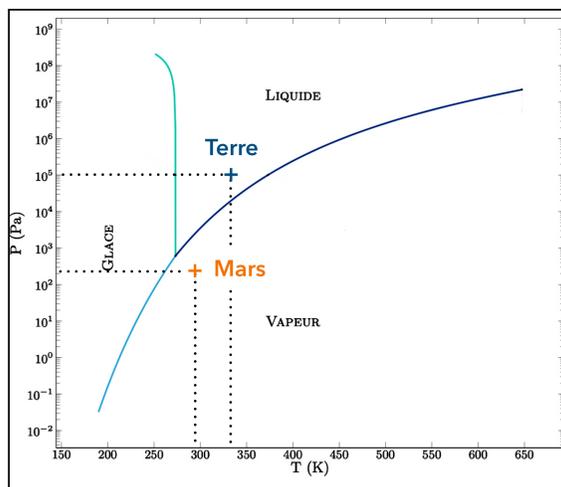


Figure 2 : Diagramme de phase de l'eau avec les valeurs maximales de pressions atmosphériques et de températures de surfaces actuelles de la Terre (331 K ; 101,3 kPa) et de Mars (293 K ; 0,610 kPa).

2. Le passé de Mars

Au début de son histoire, les conditions sur Mars étaient très différentes de celles que l'on connaît aujourd'hui. Les températures à la surface et la pression atmosphérique de Mars étaient très probablement plus élevées, ce qui a permis à l'eau d'y exister à l'état liquide. Celle-ci a d'ailleurs laissé des traces sur la surface de Mars qui sont encore visibles aujourd'hui (Fig. 3). Or, pour que l'eau liquide puisse exister à la surface de Mars, il fallait que son atmosphère soit suffisamment dense. Ainsi, les chercheurs pensent que durant ses premières centaines de millions d'années, l'atmosphère de Mars était très différente de celle d'aujourd'hui.

3. Mars aujourd'hui

Aujourd'hui, et d'après les analyses réalisées au cours des différentes missions d'étude de l'atmosphère de Mars, il est démontré que l'eau ne peut qu'exister à l'état solide ou gazeux. La faible densité atmosphérique martienne est responsable d'une pression atmosphérique moyenne environ 166 fois plus faible que celle de la Terre. À de telles pressions, l'eau à l'état liquide ne peut exister. Ainsi, la vie telle qu'on la connaît n'est pas possible aujourd'hui sur Mars.

- **Distance moyenne au Soleil :** 227 939 200 km
- **Âge :** ≈ 4,6 milliards d'années
- **Rayon équatorial :** 3 396,2 km
- **Masse :** 6,4185 x 10²³ kg
- **Période de révolution :** 687 j
- **Période de rotation :** 24,65 h
- **Inclinaison de l'axe de rotation :** 25,19 °
- **Pression atmosphérique moyenne :** 6 mbar
- **Température de surface :** -63 °C moyenne (+20 °C à -133 °C)

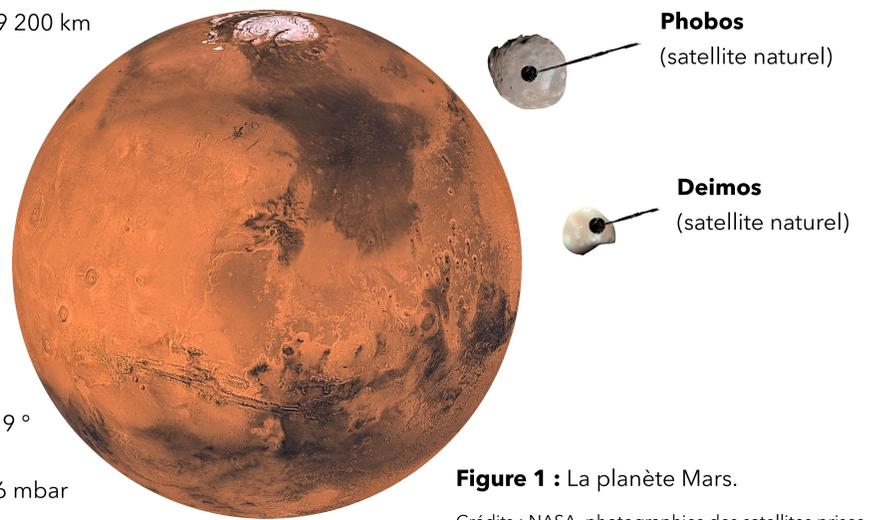


Figure 1 : La planète Mars.
Crédits : NASA, photographies des satellites prises par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter.

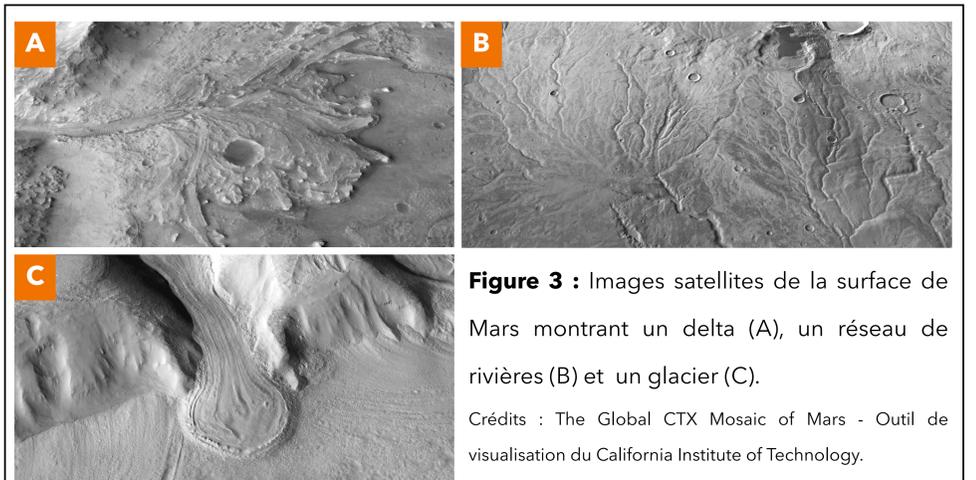


Figure 3 : Images satellites de la surface de Mars montrant un delta (A), un réseau de rivières (B) et un glacier (C).
Crédits : The Global CTX Mosaic of Mars - Outil de visualisation du California Institute of Technology.

4. Disparition du champ magnétique et érosion de l'atmosphère

L'atmosphère de Mars a donc beaucoup changé entre son lointain passé et aujourd'hui. Que s'est-il passé ? Tout d'abord, il faut savoir que la construction d'une atmosphère se fait par différents processus et notamment par une activité volcanique permettant l'éjection de gaz (dioxyde de carbone, eau, méthane, etc.) à la surface. Ces gaz éjectés forment alors l'atmosphère et sont protégés des radiations solaires par le champ magnétique de la planète. Sans ce dernier, les gaz atmosphériques seraient éjectés dans l'espace. Dans son passé, Mars avait donc un champ magnétique global permettant l'existence d'une atmosphère suffisamment dense pour que l'eau liquide existe à sa surface. Cependant, il y a environ 3,7 milliards d'années, le noyau ferrique de Mars s'est probablement refroidi (contrairement à celui de la Terre). Ce phénomène a entraîné la disparition du champ magnétique martien exposant l'atmosphère de Mars et l'eau liquide à la surface aux puissants vents solaires.

5. De la vie sur Mars ?

Sur Terre, les plus anciennes traces de vie aquatiques remonteraient à environ 3,8 milliards d'années. Si la vie est apparue sur Mars à la même période, elle aurait pu évoluer pendant une centaine de millions d'années avant que le champ magnétique martien ne disparaisse et n'efface cette vie potentielle (Fig. 4). Ces formes de vie auraient alors été microscopiques et en trouver des fossiles sur Mars paraît aujourd'hui impossible. Cependant, les scientifiques sont actuellement à la recherche, dans les couches sédimentaires de Mars, de roches appelées stromatolites « fabriquées » par ces micro-organismes. Sur Terre, celles-ci sont la signature des premières formes de vie et en trouver sur Mars serait une preuve que notre voisine rouge a un jour abrité la vie.

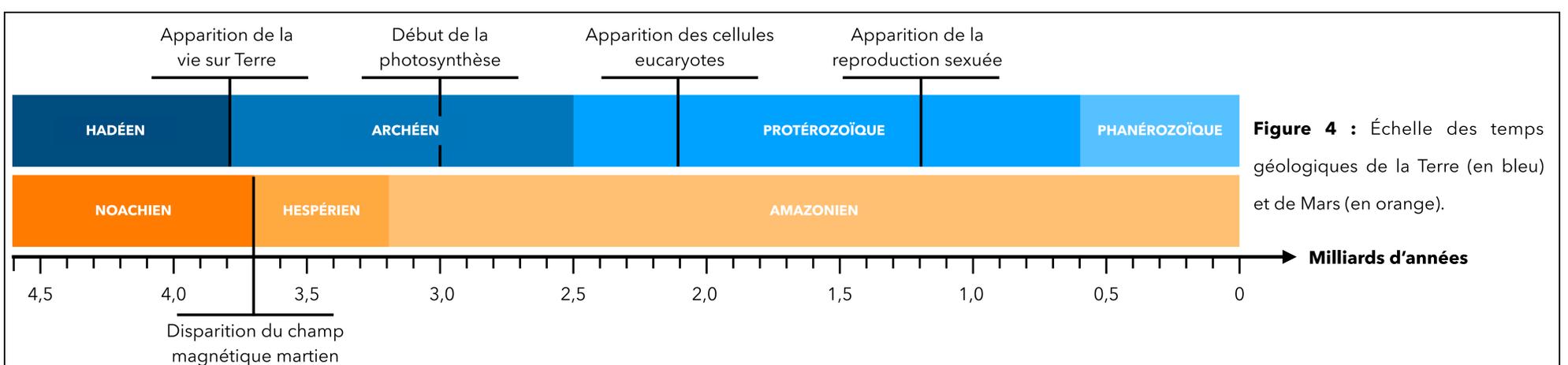


Figure 4 : Échelle des temps géologiques de la Terre (en bleu) et de Mars (en orange).

Projections à haute résolution de la chaleur ambiante pour les grandes villes européennes à l'aide de différentes métriques de chaleur. (1/2)

Article original (2023) : *High-resolution projections of ambient heat for major European cities using different heat metrics.*

Clemens Schwingshackl, Anne Sophie Daloz, Carley Iles, Kristin Aunan, and Jana Sillmann

CICERO Center for International Climate Research, Oslo, Norway

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 24, 331–354, 2024, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-331-2024>

Vulgarisation scientifique / Programme DECODER* (2024) : Abderrahman C. - Ceyda K. - Eda B. - Farah B. - Forlàn X. - Hayri D. - Leyan K. - Lorick L. - Mohamed Mehdi D. - Nathan C. - Semih C. - Yanis D. - Zahir B. (5° - 4°)

Le contexte :

Le réchauffement climatique peut avoir des conséquences importantes sur l'ensemble d'une société. Les vagues de chaleur et les températures extrêmes menacent fortement les personnes vulnérables comme les enfants, les personnes âgées et les personnes malades.

Le stress thermique provoqué par l'augmentation des températures notamment dans les grandes villes est un autre facteur à considérer. Dans ce cas, le corps humain a de plus en plus de difficultés pour évacuer toute la chaleur qu'il reçoit. Dans son ensemble, une population peut ainsi voir les taux de mortalité et de morbidité (nombre de malades) augmenter.

Afin de mieux comprendre ces impacts et pour accompagner à la mise en place de mesures d'adaptation, l'équipe de chercheurs, dont Anne Sophie Daloz fait partie, a étudié les projections de chaleur ambiante pour 36 grandes villes européennes.

A l'échelle d'une ville, il peut être très difficile de représenter et prédire l'évolution de la chaleur ambiante car cela dépend fortement du climat mais aussi de la configuration des territoires étudiés. Ainsi les architectures et aménagements urbains mais aussi les réseaux de transport et les activités industrielles existantes influencent les phénomènes physiques en jeu.

Ces configurations de territoire peuvent accentuer le stress thermique et rendre à termes difficilement gérables les vagues de chaleur pour certaines grandes villes européennes notamment.

L'étude se concentre sur les grandes villes car une large partie de la population Européenne est citadine. Il s'y trouve donc davantage de personnes vulnérables.

La méthode :

L'équipe à laquelle appartient Anne Sophie Daloz s'est appuyée sur trois métriques basées essentiellement sur la température. Cette variable d'après de nombreuses études épidémiologiques, est le facteur dominant des effets néfastes du réchauffement climatique sur la santé. Les métriques sont calculées à partir d'une ou plusieurs variables et permettent de donner des valeurs afin de quantifier le stress thermique. Ainsi, ces métriques sont souvent basées sur la température mais peuvent aussi inclure l'humidité ambiante, le rayonnement solaire ou même la vitesse du vent.

Dans cet article, les chercheurs se concentrent sur celles liées à la température de l'air près de la surface, à savoir :

- les changements de la température maximale annuelle près de la surface ;
- le nombre de jours par an où la température maximale quotidienne de l'air près de la surface dépasse 30°C ;
- le HWMI (Heat Wave Magnitude Index Daily) que l'on peut traduire par l'indicateur journalier de l'amplitude des vagues de chaleur.

Un dernier paramètre est pris en compte avec la température minimale quotidienne de l'air près de la surface.

Les scientifiques ont également dû utiliser des combinaisons de modèles climatiques performants (Euro-Cordex) avec une maille de résolution spatiale de 12,5 km. Ces outils leur permettent de modéliser comment les températures et la chaleur ambiante devraient augmenter à l'avenir dans 36 grandes villes européennes. Parmi toutes les données prises en compte, certaines sont issues de stations de mesures implantées dans les grandes villes voire d'observations satellitaires sans être majoritaires pour autant. Cependant l'utilisation de mesures réalisées par des satellites est très utile dans d'autres études de climatologues.



Source : sentinel3.copernicus.eu

Dans un premier temps, les chercheurs ont analysé comment les simulations Euro-Cordex reproduisent les distributions de températures mesurées dans les grandes villes par rapport aux observations passées. Ils ont ensuite quantifié l'évolution de la chaleur ambiante urbaine à cause du réchauffement climatique en fonction des trois indicateurs de chaleur précédents. Ils évaluent aussi comment le choix des métriques modifient les projections de chaleur ambiante. Ceci est important dans le contexte de l'adaptation au changement climatique puisque ces informations peuvent contribuer à la mise en place de politiques d'adaptation appropriées contre les risques pour la santé liés à la chaleur ambiante.

Le cas des îlots de chaleur :

Dans les grandes villes la problématique des îlots de chaleur est aussi importante. C'est une des manifestations concrètes de l'impact des activités humaines sur le stress thermique vécu par les populations. Les causes de ces îlots de chaleur sont assez bien connues :

- les constructions massives et hautes qui bloquent le passage du vent et le rayonnement solaire ;
- certains matériaux de construction qui accumulent l'énergie de température la journée pour mieux la dissiper la nuit ;
- le déficit en végétation et le manque de points d'eau ;
- les activités industrielles, de transport et la climatisation.

Comment expliquer ce qu'est un modèle de climat ?

Un modèle en sciences est en général développé pour expliquer, comprendre, voire anticiper des phénomènes complexes.

En climatologie, les modèles sont construits à partir de lois physiques qui décrivent par exemple les nombreux phénomènes atmosphériques. Ils peuvent prendre en compte aussi les interactions avec les mers, les océans, les terres et les espaces végétalisés.

Un modèle climatique est un support pour estimer le climat qu'il fera dans les prochaines années mais aussi mieux comprendre certains processus comme l'impact du changement climatique sur les précipitations (neige et pluie), les cyclones tropicaux ou les vagues de chaleurs par exemple.

Dans les années 1980 la taille de la maille du quadrillage des modèles climatiques était de 500 km environ. Aujourd'hui elle peut atteindre quelques kilomètres. Travailler sur des mailles plus petites est plus précis dans les projections et permet dans certains cas de distinguer des différences de climats à venir à l'intérieur de grandes métropoles ou de grandes zones géographiques.

Ces scientifiques ont utilisé 72 combinaisons de modèles de climat appelés Euro-Cordex afin d'analyser les projections de 36 grandes villes européennes.

Quels ODD sont concernés ? Source : www.un.org

Les objectifs de développement durable nous donnent la marche à suivre pour parvenir à un avenir meilleur et plus durable pour tous. Ils répondent aux défis mondiaux auxquels nous sommes confrontés.



Projections à haute résolution de la chaleur ambiante pour les grandes villes européennes à l'aide de différentes métriques de chaleur. (2/2)

Article original (2023) : *High-resolution projections of ambient heat for major European cities using different heat metrics.*
Clemens Schwingshackl, Anne Sophie Daloz, Carley Iles, Kristin Aunan, and Jana Sillmann
CICERO Center for International Climate Research, Oslo, Norway
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 24, 331–354, 2024, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-331-2024>

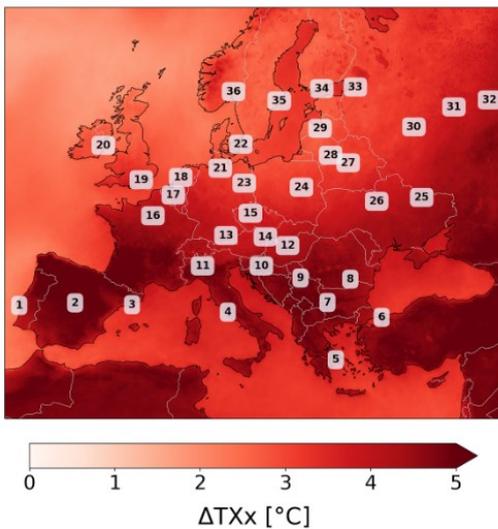
Vulgarisation scientifique / Programme DECODER* (2024) : Abderrahman C. - Ceyda K. - Eda B. - Farah B. - Forlàn X. - Hayri D. - Leyan K. - Lorick L. - Mohamed Mehdi D. - Nathan C. - Semih C. - Yanis D. - Zahir B. (5° - 4°)

Résultats et Conclusions :

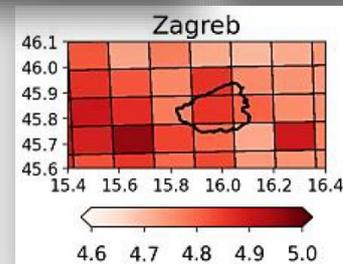
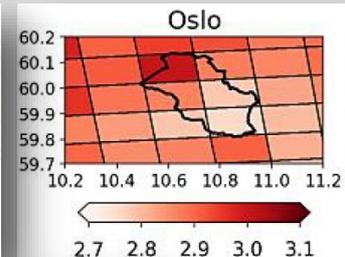
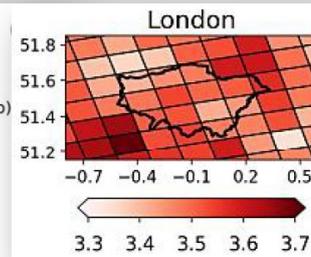
Même si les chercheurs de cette étude reconnaissent que de futures recherches seront nécessaires, ils proposent les résultats suivants :

- 1- Toutes les villes sont touchées au moins par l'accroissement de la chaleur ambiante. Mais le niveau d'augmentation de la chaleur ambiante n'est pas identique pour toutes les villes choisies. Cela dépend des métriques prises en compte pour la prévision.
- 2- Une augmentation de la chaleur ambiante nocturne est observée. Malgré tout, parmi ces métriques, l'HWMI augmente plus fortement le jour que la nuit. Cela peut avoir des conséquences sur la santé des populations urbaines. Il est important que les habitants puissent se rafraîchir et se reposer la nuit.
- 3- Les simulations Euro-Cordex utilisées par l'équipe de chercheurs sont cohérentes, fiables comparées aux observations déjà faites dans les 36 grandes villes européennes étudiées ici. Ces simulations sont vraiment intéressantes grâce à leur haute résolution spatiale et des mailles de l'ordre de 11 à 12 km. Ce qui est important pour travailler sur des zones climatiques différentes et étudier les impacts du changement climatique pour les grandes villes européennes.
- 4 et 5- D'après les projections à partir des modèles climatiques utilisés, les chercheurs se rendent compte que la distribution de la chaleur ambiante dépend fortement des métriques utilisées. Ce constat est d'autant plus vrai pour des villes comme Barcelone, Lisbonne, Oslo et Varsovie. Cela justifie la prise en compte simultanée des 3 métriques pour espérer être au plus près d'une réalité possible.
- 6- Les projections de chaleur ambiante que proposent cette équipe de chercheurs ne peuvent qu'intéresser les grandes villes européennes. En effet, à cause de leur accroissement de population et de leur structure et organisation, ces territoires vont devenir rapidement des points chauds « hotspots » du climat. Les chercheurs estiment que les pouvoirs politiques et décideurs de ces métropoles pourront améliorer les mesures d'adaptation déjà mises en place pour permettre aux habitants de mieux supporter ces futures vagues de chaleur. Un travail sur les îlots de chaleur doit s'engager en faisant intervenir la nature (eau et végétation). Les enjeux de santé publique sont très importants.

Une analyse plus large du risque climatique lié à l'augmentation de la chaleur ambiante pour la santé est nécessaire. Elle doit inclure d'autres facteurs liés à l'exposition et à la vulnérabilité à la chaleur. Tout en sachant que l'exposition et la vulnérabilité peuvent fortement varier d'un individu à un autre et entre les villes.



- | | |
|---------------------|------------------------------|
| 1: Lisbon (Lis) | 19: London (Lon) |
| 2: Madrid (Mad) | 20: Dublin (Dub) |
| 3: Barcelona (Bar) | 21: Hamburg (Ham) |
| 4: Rome | 22: Copenhagen (Cop) |
| 5: Athens (Ath) | 23: Berlin (Ber) |
| 6: Istanbul (Ist) | 24: Warsaw (War) |
| 7: Sofia (Sof) | 25: Kharkiv (Kha) |
| 8: Bucharest (Buc) | 26: Kyiv |
| 9: Belgrade (Bel) | 27: Minsk (Min) |
| 10: Zagreb (Zag) | 28: Vilnius (Vil) |
| 11: Milan (Mil) | 29: Riga |
| 12: Budapest (Bud) | 30: Moscow (Mos) |
| 13: Munich (Mun) | 31: Nizhny Novgorod (Nizh) |
| 14: Vienna (Vie) | 32: Kazan (Kaz) |
| 15: Prague (Pra) | 33: Saint Petersburg (St Pe) |
| 16: Paris (Par) | 34: Helsinki (Hel) |
| 17: Brussels (Bru) | 35: Stockholm (Sto) |
| 18: Amsterdam (Ams) | 36: Oslo |



Voici un exemple de figures présentes dans l'article. Celles-ci présentent les différences de températures maximales annuelles près de la surface de la Terre entre un scénario où le réchauffement climatique atteint 3°C à l'échelle de la planète par rapport à la période de référence 1981-2010. Les axes des documents de droite reportent les latitudes et longitudes.

Mots de Anne Sophie Daloz (2024) : « Merci aux élèves et à leurs professeurs pour leur travail, leur sérieux et leur énergie tout au long du développement du poster. De mon point de vue, cet échange entre chercheur, élèves et enseignants est toujours très instructif et une grande source de motivation. Encore merci à toutes et tous ! En espérant que cet échange développera peut-être quelques vocations. »
(DECODER* : Association qui imagine un journal pluridisciplinaire dans lequel des chercheur.e.s peuvent publier leurs articles dans une version « vulgarisée », en accès libre. Ces articles vulgarisés sont ensuite validés après un travail de relecture de collégien.ne.s, et/ou lycéen.ne.s mis.e.s en contact avec le.la chercheur.e.)

