



WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Une première croûte mince et à moitié fondue : un modèle où les impacts, pas la chaleur interne, dominaient l'Hadéen

Le premier éon de la Terre, l'Hadéen, n'a presque laissé aucune archive rocheuse. Cette étude de modélisation demande à quoi ressemblait la croûte quand on cesse d'ignorer les impacts. Avec un modèle stochastique et décroissant du flux d'impacts et des simulations benchmarkées du flux de chaleur dans la croûte et le manteau, les auteurs concluent que la chaleur des impacts aurait dépassé toute la chaleur interne terrestre d'au moins un ordre de grandeur pendant la majeure partie de l'Hadéen, laissant une croûte mince (moins de ~5 km) partiellement fondue à quelques kilomètres de profondeur — trop faible, selon eux, pour la tectonique des plaques, et portée à se recycler dans le manteau, ce qui expliquerait pourquoi si peu de matériau hadéen survit. Quand les impacts ont diminué après ~3,9 Ga (environ 3,9 milliards d'années), une croûte continentale durable pouvait se former, au moment même où apparaissent les plus anciennes roches felsiques survivantes — « probablement pas une coïncidence », dans les mots prudents des auteurs. Comme ils ont délibérément utilisé un chauffage conservateur de borne basse, le résultat qualitatif est robuste même si les nombres exacts ne sont pas fixés. C'est un modèle fort et cohérent de l'enfance terrestre — pas une observation directe.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso
· AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: [10.1126/science.aeb5402](https://doi.org/10.1126/science.aeb5402)

Le chapitre de l'histoire terrestre dont il reste presque aucune page

La Terre est la seule planète que nous connaissons avec des continents — ces terres flottantes riches en silice sur lesquelles nous vivons. Pourtant, la manière dont les premiers continents se sont formés reste l'un des plus vieux problèmes non résolus de la géologie, pour une raison brutale : les preuves ont presque entièrement disparu.

Le premier éon de la Terre, l'Hadéen, va de la naissance de la planète à environ 4,03 milliards d'années (Ga). De ce premier demi-milliard d'années, presque rien ne survit. Les plus anciennes roches felsiques intactes, de type continental, ont environ 4,03 Ga. Quelques rares roches basaltiques atteignent ~4,2 Ga. Le plus vieux matériau de quelque type que ce soit est une poignée de cristaux de zircon — surtout ceux de Jack Hills, en Australie occidentale — datés à 4,4 Ga. C'est toute l'archive de l'enfance terrestre : quelques localités et des minéraux de la taille de grains de sable.

Cette étude n'ajoute pas une nouvelle roche à cette archive. Elle fait autre chose : elle construit un modèle physique de ce à quoi aurait ressemblé la croûte hadéenne sous cette physique, puis pose une question que la plupart des modèles de Terre primitive laissent de côté. Que se passe-t-il quand on cesse d'ignorer que la Terre primitive était bombardée ?

La réponse des auteurs est frappante. Pendant la majeure partie de l'Hadéen, la chaleur apportée par les impacts aurait submergé toute la chaleur interne de la Terre, laissant la croûte mince et à moitié fondue — trop faible, selon eux, pour quelque chose ressemblant à la tectonique des plaques moderne. C'est un modèle, pas une mémoire. Mais c'est un modèle qui, pour une fois, essaie de tenir compte de la violence de l'époque qu'il décrit.

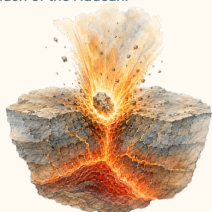
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

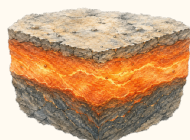
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

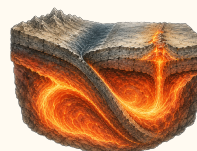
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

La chaleur d'impact domine le budget énergétique du modèle, une croûte mince fondue à faible profondeur se recycle elle-même, et une croûte continentale durable n'apparaît qu'autour de la transition 4,0-3,9 Ga. C'est un modèle de l'Hadéen, pas une mémoire directe.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ce que les auteurs ont fait

L'équipe a combiné trois ingrédients généralement gardés séparés.

D'abord, un **modèle stochastique du flux d'impacts** — la pluie d'astéroïdes et de corps plus grands frappant le Système solaire interne pendant l'Hadéen et le début de l'Archéen. Point crucial, ce n'est pas l'ancienne idée d'un pic unique de « Late Heavy Bombardment ». C'est un flux intense au début qui **décline avec le temps**, avec de grands impacts arrivant au hasard (stochastiquement) plutôt que selon un calendrier. Le modèle est rescalé à partir des statistiques d'impacts lunaires et du Système solaire interne, et choisi pour être compatible avec les spectres d'âge des zircons et les preuves paléomagnétiques disponibles.

Ensuite, des **simulations géodynamiques** de la manière dont la chaleur se déplace dans la croûte et le manteau supérieur. Les auteurs ont utilisé un code lattice-Boltzmann benchmarké (Planet_LB), avec à la fois des calculs simples 1D de température en fonction de la profondeur et des instantanés complets 2D de convection du manteau à 4,1 Ga. Ils incluent les sources de chaleur internes ordinaires — désintégration radioactive et chaleur du noyau — et surtout l'**advection magmatique** : la chaleur transportée vers le haut par la remontée de magma, que la plupart des modèles thermiques de croûte omettent.

Troisièmement, une **modélisation d'équilibre de phases** d'une croûte primitive réaliste — un metabasalte hadéen hydraté de la ceinture de roches vertes de Nuvvuagittuq — pour déterminer à quelle température et profondeur une telle roche commencerait à fondre.

Un choix méthodologique compte pour lire tout l'article : les auteurs ont volontairement empilé le jeu *contre* leur propre conclusion. Ils ont supposé un manteau « non chondritique » (contenant moins d'éléments radioactifs producteurs de chaleur que la référence chondritique), avec moins de la moitié du chauffage interne du modèle standard, utilisé des taux de chauffage conservateurs et ignoré le chauffage de marée dû à la jeune Lune proche. Leurs températures crustales calculées sont donc des **minima** — des bornes basses. Si quelque chose, le vrai Hadéen était plus chaud que leur modèle.

Ce qu'ils ont trouvé

Les impacts, pas la chaleur interne, dominaient le budget énergétique hadéen. Quand la chaleur d'impact est intégrée dans le temps, elle dépasse de loin la contribution interne — d'au moins un ordre de grandeur pendant la majeure partie de l'Hadéen. Dans cette image, le chauffage par impacts, pas la désintégration radioactive, est le moteur principal de la tectonique primitive, et il ne devient

secondaire qu'après environ **3,9 Ga**.

Cette chaleur gardait la croûte mince et fondue à faible profondeur. Sans impacts ni advection de magma, leur modèle donne une croûte hadéenne partiellement fondue seulement sous environ 10-15 km. Ajoutez la chaleur des impacts, et la zone de fusion remonte fortement : la croûte devient partiellement fondue à seulement quelques **kilomètres de profondeur** (sous environ 2-5 km). Vers 5 km de profondeur, les modèles prédisent plus de 30 % de fusion — un état où la roche est trop faible pour tenir comme une plaque rigide. À 5-10 km, des températures de ~1000-1100 °C signifient que la croûte est largement fondue presque quelle que soit sa composition. La croûte solide survivante aurait été **mince, sous environ 5 km**.

Une croûte à moitié fondue s'efface elle-même. Une fusion étendue laisse le matériau dense, riche en fer et magnésium, s'enfoncer et se séparer, tandis que des liquides plus légers et riches en silice montent. Avec le temps, cela pousse la croûte moyenne vers des compositions plus évoluées et riches en silice — et produit le type de liquide felsique qui peut cristalliser du zircon. Presque toute cette croûte mince aurait ensuite été recyclée vers le manteau convectif, ce qui colle au registre chimique (isotopique). Dans ce modèle, la quasi-absence de roche hadéenne n'est pas un trou dans l'archive : c'est une *prédiction*. Les roches de 4,2 Ga et les zircons de 4,4 Ga sont les rares survivants d'une croûte surtout détruite aussi vite qu'elle se formait.

La fin du bombardement s'aligne avec les premiers continents durables. À mesure que le bombardement diminuait pendant la transition 4,0-3,9 Ga, la croûte pouvait enfin s'épaissir et durer. Les plus anciennes roches continentales survivantes apparaissent autour de cette même transition. Les auteurs le formulent prudemment : que la croûte continentale durable apparaisse autour de ce moment n'est « probablement pas une coïncidence ».

Leur inférence principale : dans ces conditions — une croûte mince, fondue à quelques kilomètres de profondeur — **la tectonique des plaques hadéenne est peu plausible**.

Ils montrent aussi pourquoi des travaux antérieurs étaient arrivés à la conclusion opposée. Des études précédentes sur les impacts stochastiques n'avaient trouvé qu'un effet mineur, avec moins de 2,5 % de la croûte fondue à tout moment. Ces études omettaient deux choses que celle-ci inclut : l'effet global des grands impacts sur la fusion profonde dans le manteau, et le transport vers le haut de cette chaleur par le magma remontant. Remettez-les dans le modèle, et l'image thermique change radicalement.

Pourquoi un modèle n'est pas une mémoire

Tout ce qui précède est le résultat de simulations, pas une lecture prise sur des roches hadéennes — parce que ces roches n'existent presque plus. Cela ne rend pas le résultat faible, mais cela fixe le type de résultat.

La chaîne est : un *modèle* du flux d'impacts alimente un *modèle* du flux de chaleur du manteau et de la croûte, vérifié contre un *modèle* de la manière dont une roche particulière fond. Chaque maillon est physiquement motivé et, quand c'est possible, benchmarké — mais l'ensemble est un argument

cohérent sur ce à quoi l'Hadéen *devait* ressembler compte tenu d'une physique plausible, pas une mesure de ce à quoi il a réellement ressemblé.

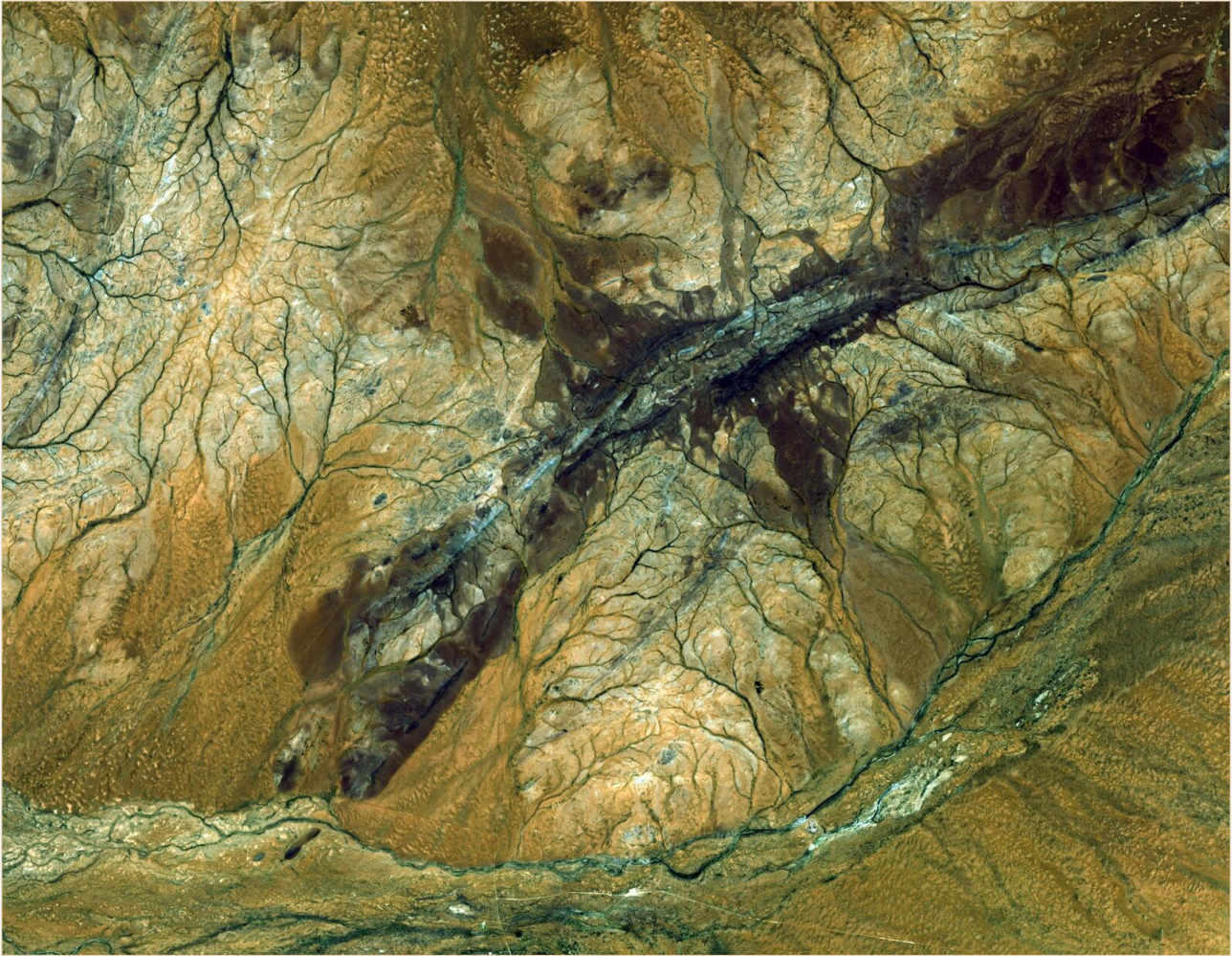
C'est pourquoi les hypothèses conservatrices des auteurs comptent plus qu'il n'y paraît. Parce qu'ils ont choisi un chauffage de borne basse et obtiennent quand même une croûte superficielle largement fondue, la conclusion qualitative — la croûte hadéenne était chaude et faible — est robuste à leurs choix. Ce qui n'est *pas* fixé ici, ce sont les nombres précis : les géothermes exacts, les fractions de fusion exactes, l'épaisseur crustale exacte. Lisez la direction du résultat comme forte et les décimales comme provisoires.

Ce que cela ne prouve *pas*

- Cela n'observe **pas** directement la croûte hadéenne. Il reste presque aucune roche de cette époque ; c'est un résultat de modélisation sur ce qu'implique la physique, pas une mesure.
- Cela ne repose **pas** sur un « Late Heavy Bombardment ». Le flux d'impacts utilisé est décroissant et stochastique — le modèle n'a pas besoin et n'invoque pas un pic soudain de bombardement.
- Cela ne règle **pas** le débat sur la tectonique des plaques. « Peu plausible » est ici une inférence forte et physiquement fondée en faveur d'une Terre primitive chaude, à couvercle stagnant ou mou — mais le mode tectonique de l'Hadéen reste réellement contesté.
- Cela ne prouve **pas** que les impacts ont *causé* l'apparition des continents autour de la transition 4,0-3,9 Ga. La coïncidence temporelle est une forte association que les auteurs eux-mêmes appellent « probablement pas une coïncidence » — langage prudent pour une corrélation convaincante, pas une cause démontrée.
- Les zircons de Jack Hills ne sont **pas** des continents préservés. Ce sont des grains survivants rares qui montrent que du matériau felsique et de l'eau existaient tôt ; tout le point du modèle est que la croûte qui les a produits a été en grande partie recyclée.
- Cela ne reconstruit **pas** une histoire complète de la Terre primitive. Les simulations sont idéalisées — profils 1D et coupes équatoriales 2D avec impacts confinés près de l'équateur, capturés comme des instantanés — pas un modèle complet à quatre dimensions de la planète.

Quelle est la force des preuves ?

Pour son affirmation centrale — le chauffage par impacts était un contrôle de premier ordre de la croûte hadéenne, la gardant mince et fondue à faible profondeur — l'argument est cohérent et, dans un sens important, conservateur. Il utilise un code de géodynamique benchmarké, des entrées physiquement raisonnables et des hypothèses de borne basse, et intègre une source de chaleur que la plupart des modèles précédents ignoraient simplement. Il gagne aussi en crédibilité en expliquant deux faits tenaces à la fois : pourquoi presque aucune roche de plus de ~4 Ga ne survit (recyclage quasi total) et pourquoi une croûte durable apparaît au moment où le bombardement s'estompe.



Jack Hills, Australie occidentale, vu par l'instrument ASTER de la NASA. Les zircons de cette région comptent parmi les plus anciens matériaux survivants connus de la croûte terrestre primitive, minuscules indices d'un éon dont les roches ont surtout été effacées.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Les limites sont tout aussi claires, et ce sont les limites de tout modèle de temps profond : ce sont des modèles construits sur des modèles, ancrés à une archive rocheuse très clairsemée, et sa conclusion la plus citée — « la tectonique des plaques est peu plausible » — est une inférence, pas une observation. La bonne posture est de traiter cela comme une hypothèse forte et bien raisonnée qui recadre l'Hadéen, et qui invite maintenant d'autres équipes à tester ses hypothèses — surtout le choix du modèle de flux d'impacts — plutôt que comme un dossier clos.

Le résumé le plus utile n'est ni « voilà à quoi ressemblait l'Hadéen » ni « ce n'est qu'une simulation ». Il est : avec une physique plausible et conservatrice, une Terre primitive sous fort bombardement aurait eu une croûte mince, à moitié fondue et auto-recyclée — et cette idée unique explique une quantité surprenante du peu que nous pouvons vraiment voir.

Pourquoi cela compte

L'image populaire de la Terre primitive oscille souvent entre deux extrêmes : un monde d'eau serein à tectonique des plaques presque comme aujourd'hui, ou une planète infernale de lave. Ce travail esquisse un milieu précis et physiquement motivé : une croûte mince, refondue à répétition à partir de quelques kilomètres de profondeur, continuellement détruite et refaite, avec les impacts — pas la chaleur interne — qui fixent les conditions.

Ce recadrage fait un vrai travail. Il offre un mécanisme pour deux des plus grands faits sur l'enfance terrestre — l'absence quasi totale d'archive rocheuse et le timing des premiers continents durables — et place au centre de l'histoire un processus souvent négligé, le chauffage par impacts. S'il tient, il change la manière de raisonner sur le moment où la Terre est devenue une planète de continents stables, et il s'étend aux autres mondes rocheux formés sous leurs propres bombardements.

Rien de cela n'exige que le modèle soit le dernier mot. Il exige qu'il soit une hypothèse assez bonne pour être testée — et, en se liant aux archives survivantes des zircons et des isotopes, il l'est. L'« Hadéen caché » du titre est exactement le point : une époque que l'on ne peut presque atteindre que par la modélisation, parce que cette époque a effacé ses propres preuves.

Résumé propre

Le premier éon terrestre, l'Hadéen (avant ~4,03 Ga), n'a presque laissé aucune archive rocheuse. Cette étude de modélisation demande à quoi aurait ressemblé la croûte une fois incluse une source de chaleur généralement omise : les impacts. Avec un modèle stochastique et décroissant de flux d'impacts et des simulations benchmarkées 1D et 2D du flux de chaleur dans la croûte et le manteau (incluant la chaleur transportée par le magma remontant), les auteurs trouvent que la chaleur d'impact intégrée dans le temps aurait dépassé toute la chaleur interne terrestre d'au moins un ordre de grandeur pendant la majeure partie de l'Hadéen. La conséquence est une croûte mince (moins de ~5 km), partiellement fondue à quelques kilomètres seulement de profondeur et, vers ~5 km, fondue à plus de 30 % — trop faible pour soutenir la tectonique des plaques, que les auteurs jugent peu plausible pour l'Hadéen. Une telle croûte se recyclerait surtout dans le manteau, ce qui expliquerait pourquoi si peu de matériau hadéen survit ; quand les impacts diminuent pendant la transition 4,0-3,9 Ga, une croûte continentale durable peut se former, autour du moment où apparaissent les plus anciennes roches felsiques survivantes — « probablement pas une coïncidence ». Comme les auteurs ont volontairement utilisé un chauffage conservateur de borne basse, le résultat qualitatif est robuste, même si les nombres exacts ne sont pas fixés. C'est un modèle fort et cohérent de l'enfance terrestre — pas une observation directe.

No-BS check

Ce que l'article montre : Dans des simulations physiquement fondées qui incluent le chauffage par impacts et le transport de chaleur magmatique, la croûte hadéenne ressort mince et partiellement fondue à quelques kilomètres de profondeur, dominée par la chaleur d'impact plutôt que par la chaleur interne, majoritairement recyclée dans le manteau, et — dans ce modèle — incapable de soutenir la tectonique des plaques.

Ce qui est plausible mais non prouvé : Que les impacts expliquent l'apparition de continents durables autour de 3,9 Ga ; que l'Hadéen était un monde à couvercle stagnant ou mou plutôt qu'à tectonique des plaques précoce ; que presque aucune roche hadéenne ne survit précisément parce qu'une croûte fondue s'est recyclée elle-même.

Ce que cela ne montre pas : Une mesure directe de la croûte hadéenne ; une réponse réglée au débat sur la tectonique des plaques ; un lien causal démontré entre le recul du bombardement et les premiers continents ; que les zircons de Jack Hills représentent des continents préservés ; un modèle complet de la planète primitive.

Principales limites : L'archive rocheuse hadéenne est presque inexistante, donc le résultat est un modèle contraint par très peu de données ; il empile des modèles sur des modèles (flux d'impacts → géodynamique → équilibres de phases) ; le flux d'impacts lui-même est un choix représentatif et incertain ; les simulations sont idéalisées (coupes 1D et 2D équatoriales, instantanés). Les hypothèses conservatrices de borne basse renforcent la conclusion qualitative mais ne rendent pas les géothermes précis.

Quel niveau de confiance pour un lecteur généraliste ? Élevé que, sous une physique plausible, une Terre primitive fortement bombardée aurait eu une croûte chaude, mince et fondue à faible profondeur. Modéré que cela rende la tectonique des plaques hadéenne improbable et explique l'archive rocheuse manquante. Bas pour toute affirmation que cela *prouve* comment les continents se sont formés ou exactement quand — c'est un modèle fort et conservateur qui recadre l'Hadéen, pas un regard direct sur lui.

Sources

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
<https://doi.org/10.1126/science.aeb5402>