

INTERLUDE RADIOLOGIQUE



Le scanner, une machine à remonter le temps



Dr Jean Claude Le Van An

CENTRE DE RADIOLOGIE CAPSUD, SAINT MARTIN BOULOGNE , FRANCE



SOMMAIRE INTERACTIF

1. Embarquement immédiat

Le scanner, une machine à remonter le temps La machine à remonter le temps

2. Matériel, méthodes et paramètres d'acquisition

3. Premier arrêt : l'ère paléozoïque

Les trilobites : authenticité, restauration et assemblages

4. Deuxième arrêt : le Crétacé

Œufs de dinosaures : vrais fossiles, restaurations et impostures

Le scanner spectral change la donne

Cartographie Z-effectif et détection de reliquats embryonnaires

Fossiles tridimensionnels du Crétacé

Jeholosaurus : authenticité et modélisation 3D

5. Troisième arrêt : le Pléistocène

Défense de mammoth : ivoire, densité et restauration

6. Méthode d'analyse scanner d'un fossile

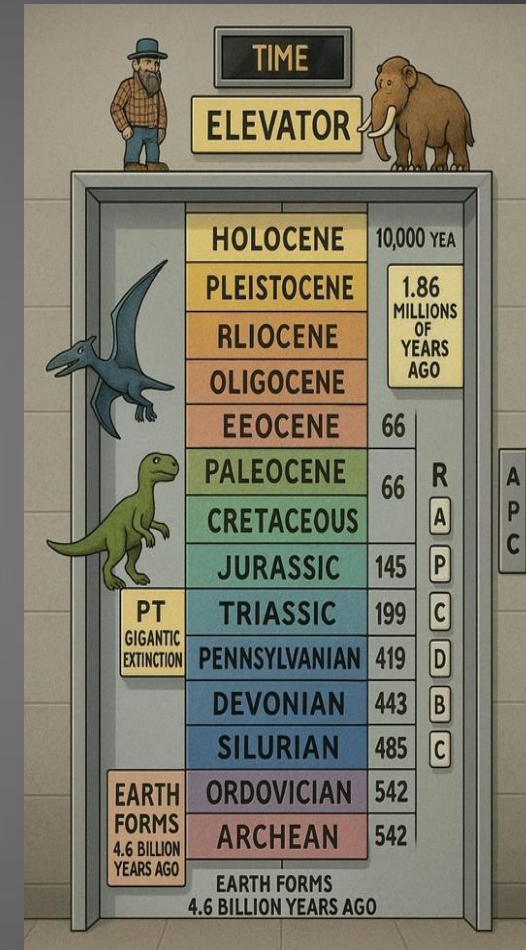
Morphologie, densité, interfaces, matrice et histogrammes

7. Ce que l'étude des fossiles apporte au radiologue

Une lecture scanner plus fine, transposable à la pratique quotidienne

8. Conclusion

Le scanner révèle ce que l'œil ne peut pas voir



EMBARQUEMENT IMMÉDIAT

Le scanner, une machine à remonter le temps

- Le scanner (TDM) permet une acquisition volumique haute résolution, associée à des reconstructions multiplanaires (MPR) et volumiques 3D, incluant les rendus de surface et de volume (VRT), avec possibilité d'étude des volumes et des densités des différentes structures.
- Au-delà de son rôle diagnostique en pratique clinique, le scanner s'impose comme un outil de choix pour l'exploration et la caractérisation de pièces archéologiques et paléontologiques.
- Déjà largement utilisée en égyptologie et en archéologie pour l'étude non invasive des pièces archéologiques, le scanner trouve également sa place dans l'expertise des œuvres d'art.
- Au-delà de la pratique clinique, l'expertise du radiologue ouvre une fenêtre sur le passé à travers l'étude des fossiles.



LA MACHINE A REMONTER LE TEMPS

Matériel et méthodes

- **Scanner :**

GE Revolution ASCEND et MAXIMA (GE Healthcare, Milwaukee, USA) pour l'acquisition standard ;
GE Revolution APEX (GE Healthcare) pour l'acquisition spectrale.

- **Acquisition:**

- **Acquisition conventionnelle :**

Mode hélicoïdal, 120 kVp, 150 -300 mAs, épaisseur de coupe 0,65 mm, pitch 0,63, temps de rotation 0,5 s, FOV adapté à la taille de l'échantillon.

- **Acquisition spectrale :**

Mode Gemstone Spectral Imaging (GSI), protocole Z-calcium sélectionné, énergie d'acquisition 80–140 kVp

- **Post-traitement :** reconstructions multiplanaires (MPR) et rendus volumiques (VRT) réalisés sur console GE AW Server (GE Healthcare).

- **Échantillons étudiés :** spécimens fossiles issus de la collection privée de l'auteur.



LA MACHINE A REMONTER LE TEMPS

Effet des paramètres d'acquisition sur la qualité d'image

ACQUISITION 1

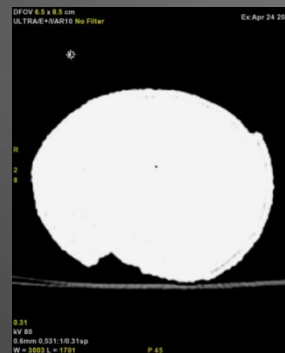
80 kV / 200 mAs

Résultat : hyperdensité uniforme, entraînant une absence de contraste et une impossibilité de différencier la coquille/os fossilisé de la matrice environnante.

ANALYSE :

Faible kilovoltage: Photons peu pénétrants, absorption forte et similaire pour la calcite et la matrice = hyperdensité homogène et perte de contraste inter-matériaux.

Haute dose (200 mAs): réduction du bruit quantique, mais sans gain de différenciation en raison du contraste limité à le kilovoltage.



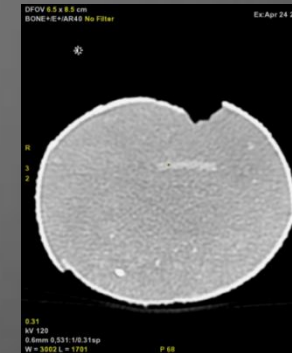
ACQUISITION 2

120 kV / 80 mAs

Résultat: Bon contraste en la coquille/ os fossilisé et la matrice environnante

ANALYSE :

Photons plus pénétrants, différence d'atténuation plus marquée entre calcite et matrice= meilleure différenciation malgré plus de bruit dû aux mAs plus faibles.



Protocole recommandé

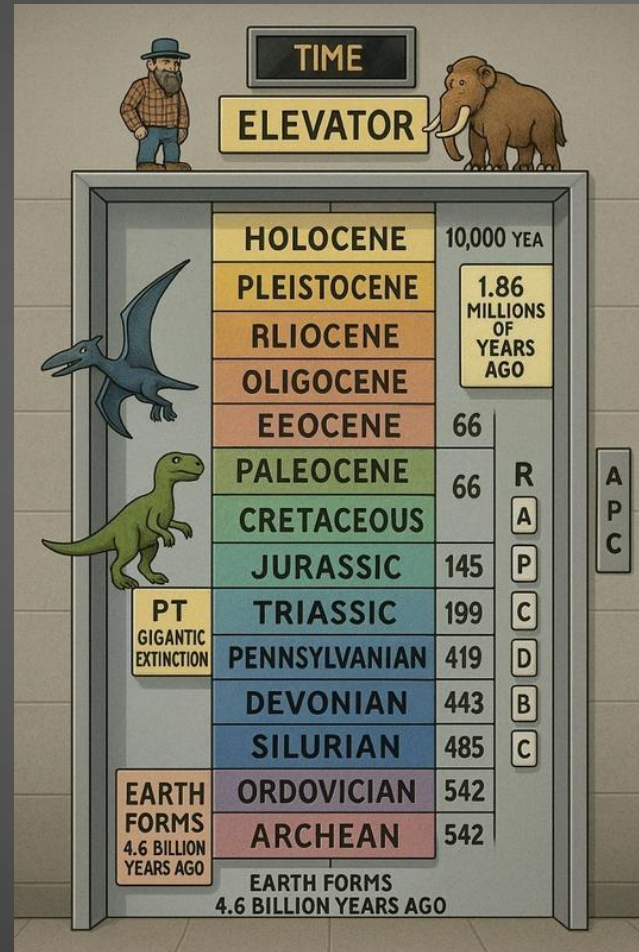
- keV: 110–120
- mAs: 200-400
- Epaisseur de coupe: 0.5–0.625 mm
- Fenetrage: Fenetre os (Niveau 500 HU / Largeur 2000 HU)
- Reconstruction kernel: "Bone Plus" or "Sharp"

L'ajustement optimal des paramètres d'acquisition est déterminant pour différencier la coquille fossilisée, la matrice sédimentaire et les matériaux de comblement interne.

PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

- 375 MILLIONS D'ANNÉES

Les trilobites

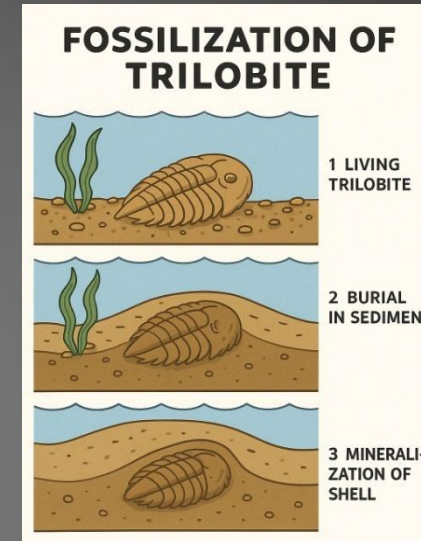


PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

- 375 MILLIONS D'ANNÉES

Les trilobites

- **TRILOBITES**
- Les trilobites étaient des arthropodes marins qui ont disparu il y a environ 250 millions d'années. Après leur mort, leurs exosquelettes furent rapidement enfouis sous des sédiments fins (boue, sable, etc.) qui se sont progressivement lithifiés pour former de la roche.
- Au cours de ce processus, des échanges chimiques ont entraîné la minéralisation de la carapace, produisant une réplique fossile fidèle de l'original.



PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

- 375 MILLIONS D'ANNÉES

Les Trilobites

Cas n°1: *Psychopyge termierorum*
(Datant du Devonien, -375 Ma)
Origine: Assa, Maroc

Deux questions essentielles se posent lors
de l'évaluation d'un spécimen fossile :

Le fossile est-il authentique ou s'agit-il d'une
réplique ?

S'il est authentique, a-t-il fait l'objet d'une
restauration ?



PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

- 375 MILLIONS D'ANNÉES

Les Trilobites

Certaines contrefaçons associent résine moderne et matrice rocheuse authentique afin d'imiter une conservation naturelle.

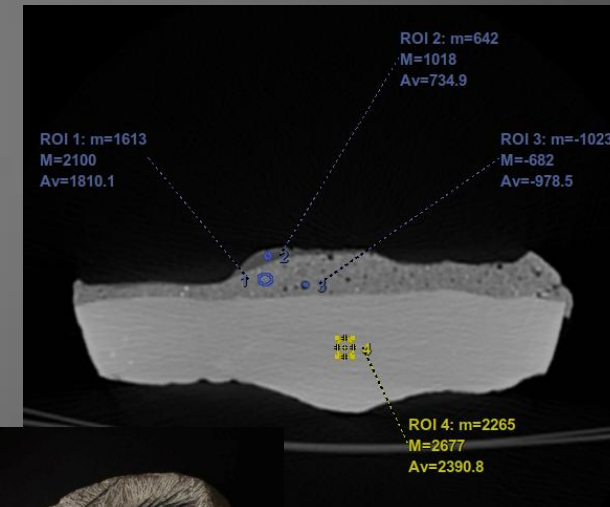
Les coupes destructives réalisées sur certains spécimens révèlent des **cavités internes** et des **différences de densité** incompatibles avec une fossilisation homogène.

Le scanner permet d'identifier ces anomalies **sans endommager le spécimen**:

- La **présence de zones hypodenses diffuses** correspond probablement à de petites bulles d'air piégées dans un matériau composite (résine, colle ou ciment), incompatibles avec une fossilisation naturelle homogène.
- Les **contrastes marqués d'atténuation** entre la **matrice naturelle très dense (>2000 UH)** et les **zones rapportées de faible densité (<1000 UH)** évoquent des matériaux modernes de restauration ou de moulage.
- Les **interfaces entre les fragments et la matrice sont planes, nettes et abruptes, sans interpénétration minérale progressive**, suggérant un assemblage secondaire artificiel.
- **L'absence de continuité minérale** entre les différentes parties du spécimen est incompatible avec une fossilisation naturelle continue.
- **Certaines zones présentent un aspect coulé ou moulé**, avec une répartition homogène des matériaux et des limites artificiellement régulières.



Burkhard H, Bode R. *Trilobitenland Marokko. Keine Angst vor Fälschungen*



PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

- 375 MILLIONS D'ANNÉES

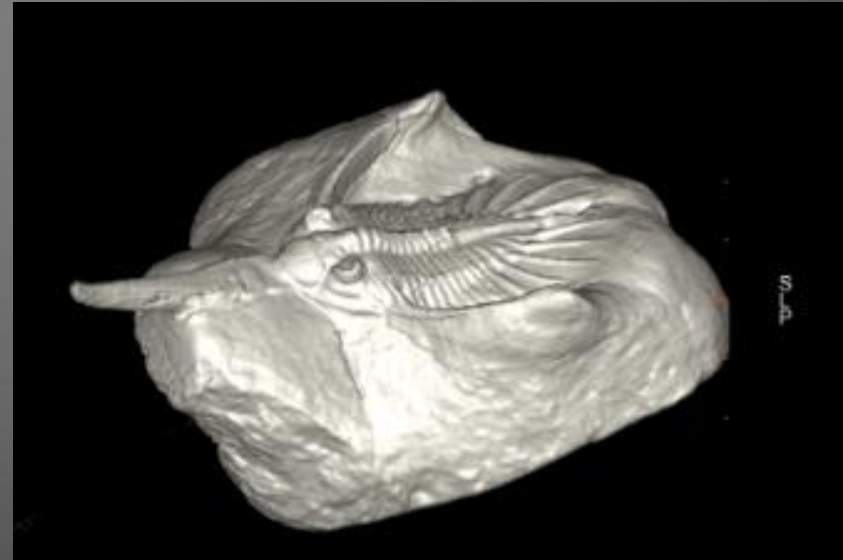
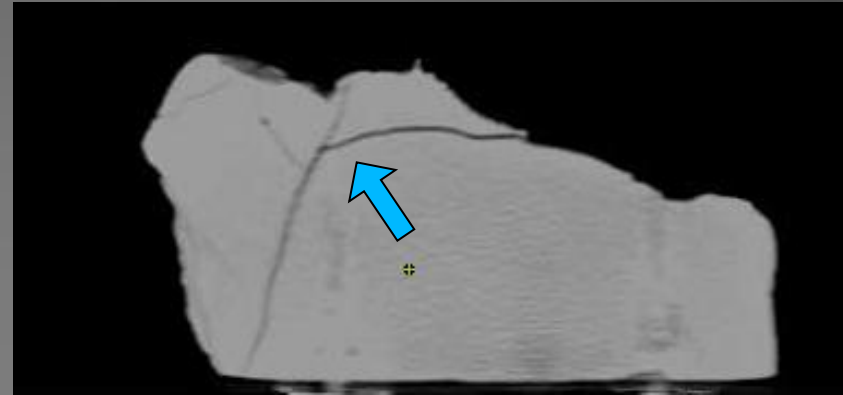
Les Trilobites

ANALYSE SEMIOLOGIQUE DU SPECIMEN

- **Absence de bulles**, d'hétérogénéité de densité, ou d'interface artificielle nette.
- **Continuité parfaite** entre le fossile et la roche, sans vide, adhésif ni matériau de comblement.
- **Les lignes de fracture** sont continues et traversent fossile et matrice sans rupture, contrairement aux faux assemblages.

CONCLUSION

spécimen authentique.



PREMIER ARRÊT : L'ÈRE PALÉOZOÏQUE

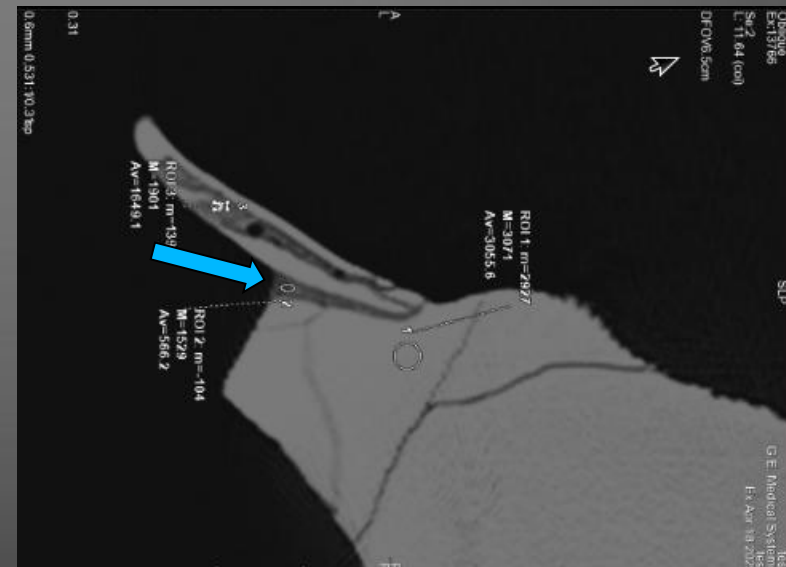
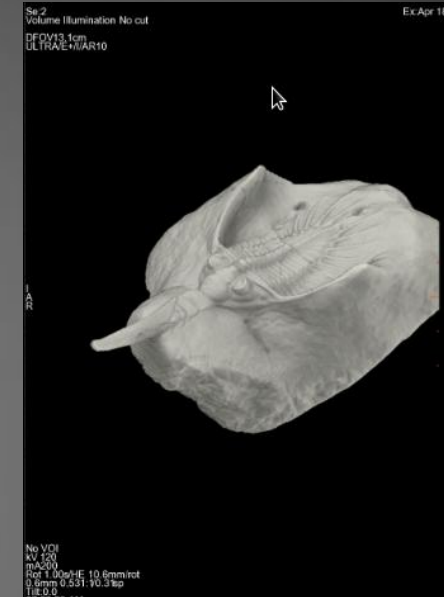
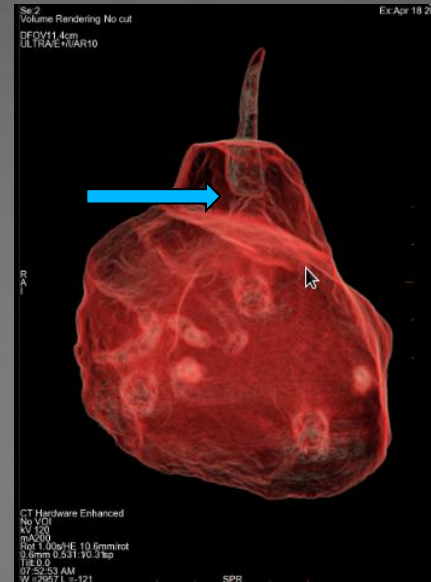
- 375 MILLIONS D'ANNÉES

Les Trilobites

Reconstruction 3D VRT avec transparence : discontinuité morphologique au niveau du rostre, suggérant un ajout artificiel.

Coupe 2D scanner :
Densité élevée homogène (3000 UH) dans le rostre et le corps, mais interface nette individualisée par un matériau de faible densité (500 UH), compatible avec une résine de collage.

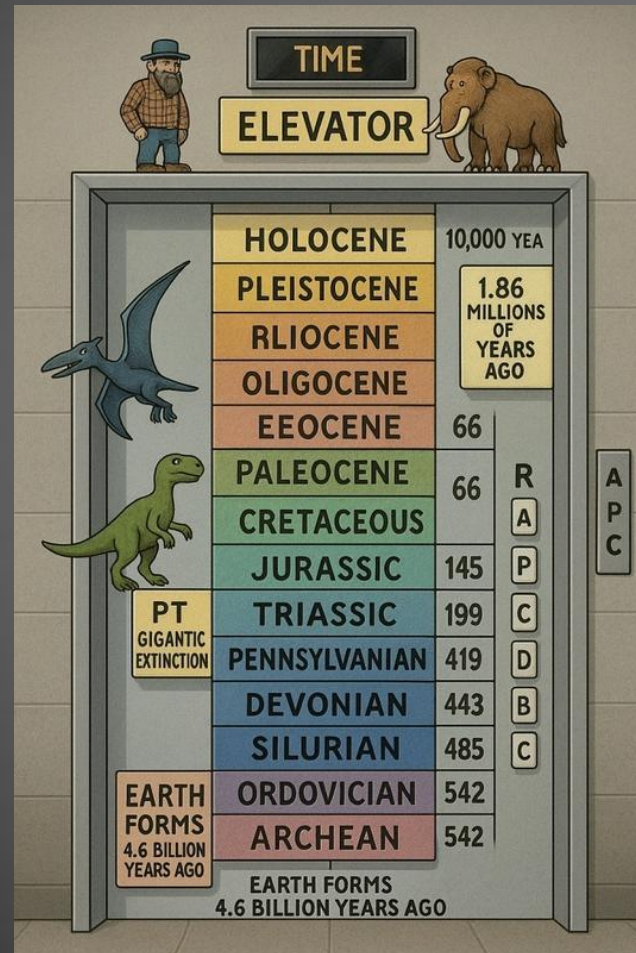
Conclusion : spécimen composite authentique, issu de l'assemblage de deux trilobites distincts.



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Ouf de dinosaure



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Fossilisation d'un œuf de dinosaure

Enfouissement rapide

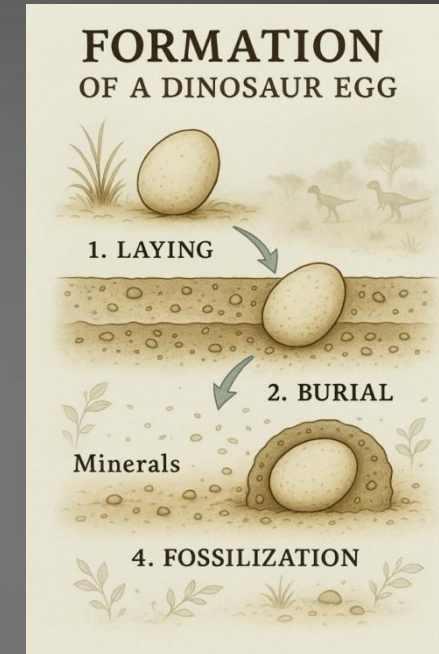
Après la ponte, les œufs sont rapidement recouverts par des sédiments (boue, sable, cendres volcaniques), ce qui limite leur dégradation biologique et mécanique.

Perminéralisation

Des fluides riches en minéraux (qu'il s'agisse d'eaux souterraines circulantes ou de solutions issues directement des sédiments) diffusent à travers la coquille et les cavités internes. Ces minéraux se déposent progressivement, remplacent ou enrobent la matière organique et assurent la stabilité structurale.

Compaction et lithification

Avec le temps, l'accumulation des dépôts entraîne la compaction des sédiments, puis leur lithification. L'œuf se retrouve alors intégré et piégé dans une roche sédimentaire. Dans des conditions favorables, la microstructure de la coquille, et parfois même des restes embryonnaires, peuvent être préservés.



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Identifier de véritables œufs de dinosaures est un défi.

Il existe de nombreux faux œufs de dinosaures sur le marché, il faut distinguer 2 types de faux:

- **Les Formations rocheuses naturellement ovoïdes:**

Certaines concrétions ou nodules géologiques peuvent revêtir l'aspect, la taille et parfois même la texture de surface d'un œuf de dinosaure, ces formations sont souvent prises à tort pour des fossiles.

- **Les contrefaçons et composites:**

- Dans certains cas, les œufs sont de **pures contrefaçons**, fabriquées en plâtre, ciment ou résine moulée, parfois sculptées dans la pierre, puis patinées pour imiter l'aspect fossile.
- Dans d'autres cas, il s'agit de **composites** : des fragments authentiques de coquille sont collés sur une matrice artificielle (souvent en plâtre ou en ciment), afin de reconstituer de manière trompeuse l'aspect d'un œuf complet.

• Dino Fossils UK. *A guide to dinosaur eggs*. Available at:
<https://www.dinofossils.co.uk/a-guide-to-dinosaur-eggs>



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Cas n°2 : un œuf de dinosaure (*Oviraptor* – *Elongatoolithus* datant du Crétacée il y a environ 70 à 80 Ma)

Origine: Jiangxi, Chine

Cet œuf de dinosaure paraît presque trop parfait pour être authentique. En général, les œufs fossilisés sont rarement retrouvés avec une coquille complète, et ils sont souvent aplatis ou écrasés sous la pression des sédiments.

Pourrait-il s'agir d'une reproduction ?

S'agit d'un œuf ayant bénéficié d'une restauration ?

Dans le cas d'un fossile authentique, un embryon est-il présent à l'intérieur ?



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

ANALYSE SEMIOLOGIQUE

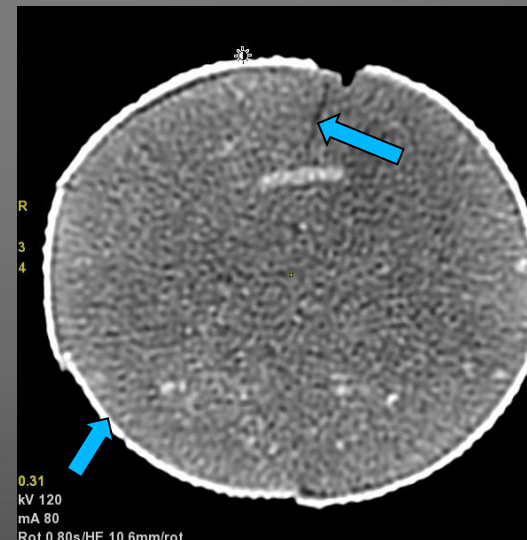
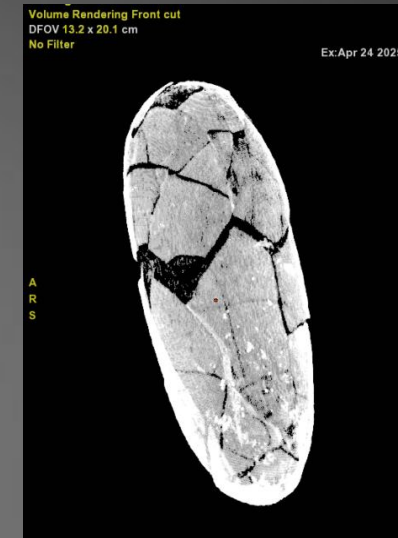
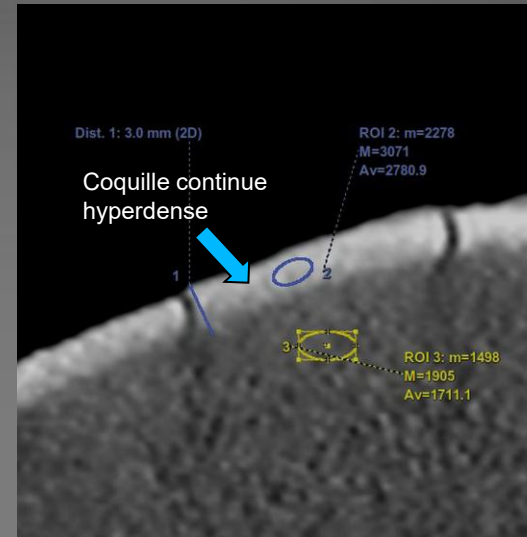
- Les fragments de coquille sont nettement individualisés en surface, **avec des densités élevées mesurées au-dessus de 2000 UH**, supérieures à celles de la matrice adjacente s'expliquant par la composition majoritairement calcitique de la coquille.

- **Microstructure interne** de la coquille visible

- **La courbure des coquilles** est régulière et leur épaisseur homogène.

- **Les fragments s'emboîtent** de façon continue, à la manière des pièces d'un puzzle. (*À l'inverse, les faux sont souvent constitués de fragments disparates, de géométrie irrégulière et d'épaisseur variable.*)

- **Les structures internes** montrent une organisation hétérogène d'allure sédimentaire, associant variations densitométriques progressives, discontinuités internes irrégulières et parfois fragments de coquille remaniés inclus dans la matrice.



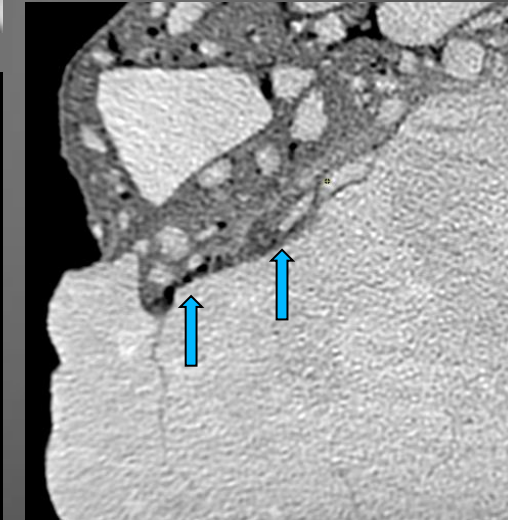
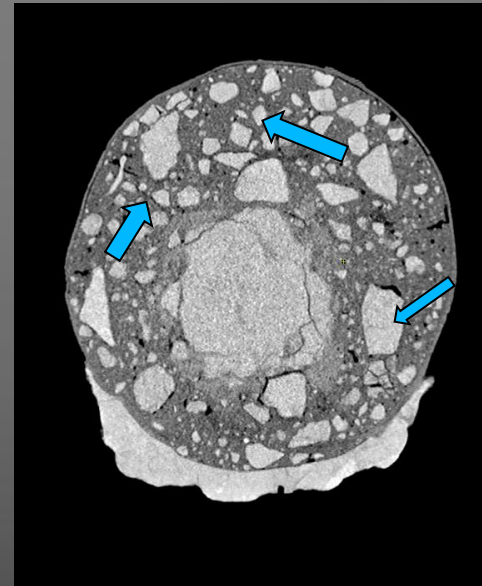
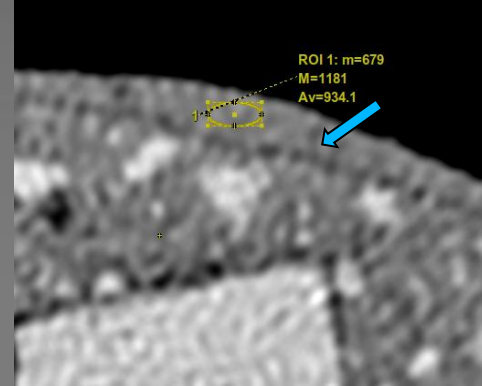
DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

SÉMIOLOGIE DU FAUX

- La coquille apparaît globalement peu dense, avec une densité faible ou proche de celle de la matrice, sans contraste net en faveur d'une minéralisation avancée.
- La microstructure interne de la coquille apparaît homogène, sans organisation interne identifiable, contrairement à l'hétérogénéité discrète habituellement observée dans les coquilles fossiles authentiques.
- Les structures internes montrent une organisation artificielle constituée d'une **matrice homogène** de type cimentaire, contenant des granulats minéraux denses comparables à des **agrégats de béton**.
- La matrice interne apparaît globalement homogène, avec peu de variations densitométriques progressives et une texture interne pauvre, contrastant avec l'hétérogénéité naturelle observée dans les remplissages fossiles authentiques.
- L'interface entre la matrice de l'œuf et celle du socle est nette et abrupte, sans interpénétration ni transition minérale progressive, traduisant une séparation artificielle entre l'objet et son support. L'absence de continuité minérale entre l'œuf et sa base peut évoquer un assemblage secondaire ou un collage.



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Signes de restauration:

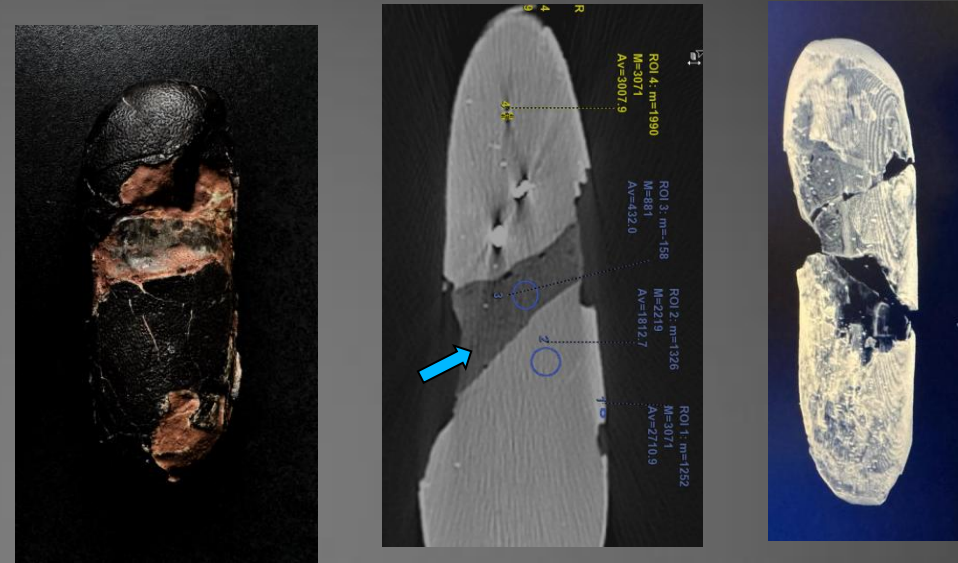
Contrairement à l'exemple précédent, ces deux œufs présentent des signes de restauration :

Bande linéaire hypodense :

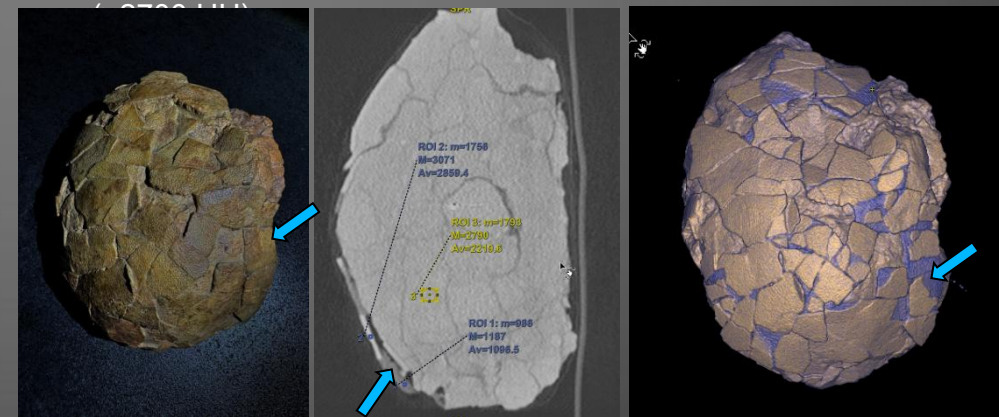
Une zone homogène relie deux fragments de coquille. Son aspect uniforme, dépourvu d'hétérogénéité interne et de continuité fracturaire naturelle, suggère un comblement artificiel.

Fragments de coquille reconstruits :

Certains éléments apparaissent moins denses que les fragments authentiques sans microstructure interne, ce qui suggère l'ajout de matériaux modernes (résines) destinés à compléter l'œuf.



Zone centrale hypodense (432 UH) correspondant à une résine de restauration ; coquille fossile originale plus dense (2700 UH)



Fragments de coquille reconstruits en résine, hypodenses par rapport aux coquilles natives, visibles en coupe 2D (gauche) et en reconstruction VR (droite).

DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Signes au scanner en faveur de la présence d'un embryon calcifié :

- **Densité** : foyers hyperdenses, mieux visibles que le comblement sédimentaire, correspondant à des zones de minéralisation osseuse.

- **Morphologie** : structures tubulaires ou arrondies, parfois articulées entre elles, évoquant des diaphyses, des vertèbres ou des épiphyses.

- **Organisation** : disposition non aléatoire, avec une orientation cohérente et des rapports anatomiques reconnaissables, se distinguant clairement des inclusions minérales fortuites.

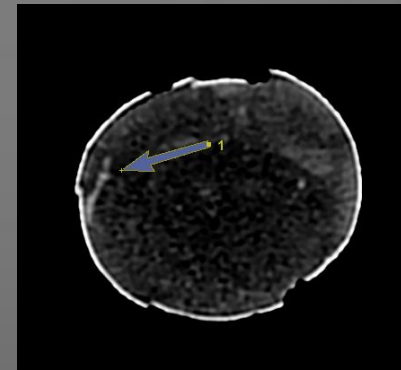
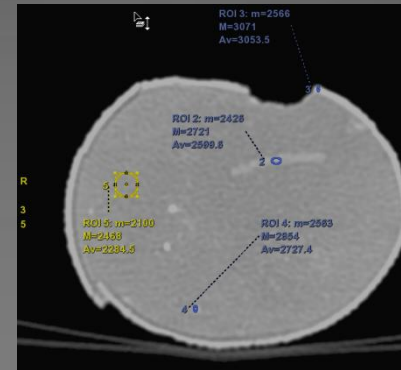
Limitations du scanner conventionnel

- **Résolution insuffisante** pour visualiser les structures embryonnaires fines.
- **Faible contraste** entre le fossile et le sédiment.
- **Les artefacts** d'image peuvent masquer certains détails.

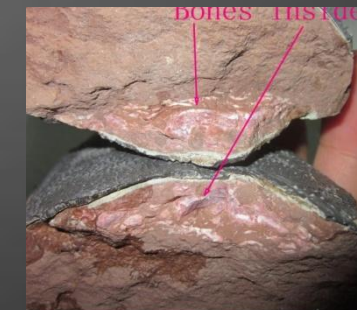
L'imagerie synchrotron surmonte ces limites:

- **Meilleure différenciation** avec l'imagerie synchrotron, alors que le scanner médical conventionnel offre une visualisation limitée des reliquats embryonnaires
- Le synchrotron offre **une résolution < 100 µm**, permettant de visualiser les structures embryonnaires fines.

À l'inverse, la résolution des scanners cliniques (200–300 µm) reste insuffisante pour les détecter.



Comparaison avec une section physique (spécimen scié).



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Le scanner spectral change la donne.

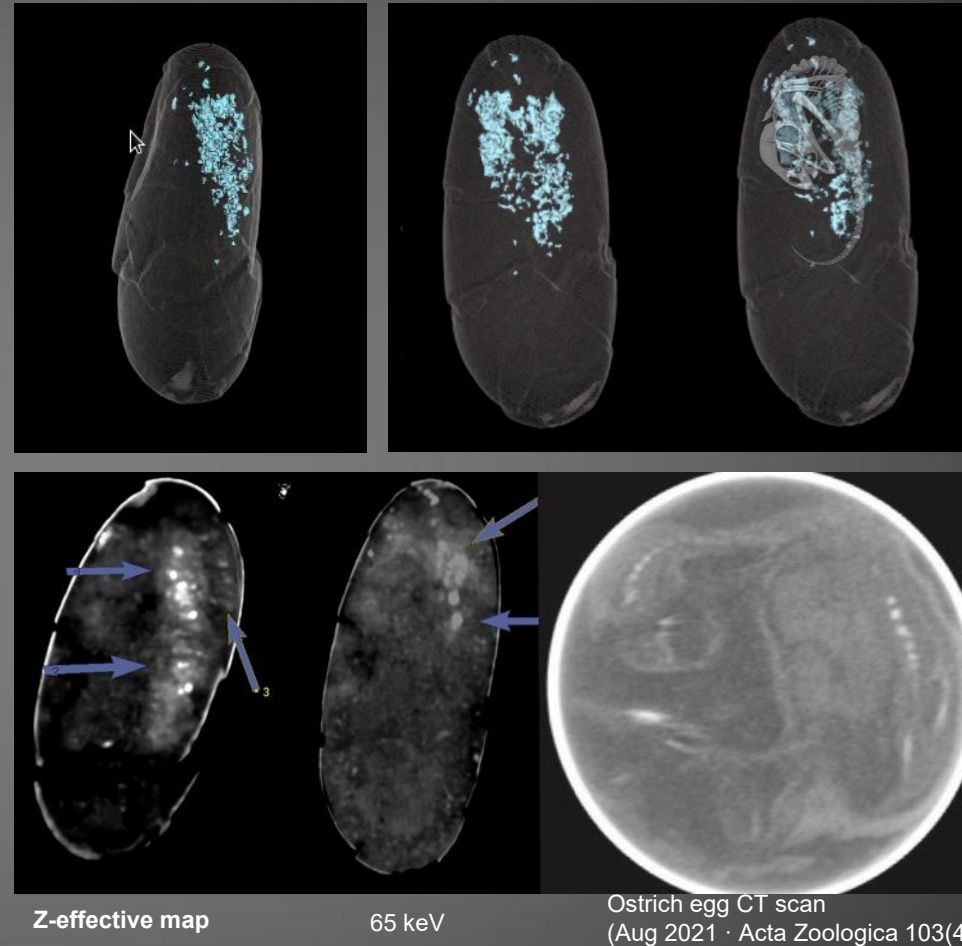
Cartographie en Z-effectif

Permet de différencier les matériaux selon leur numéro atomique effectif (Z-effectif) et non uniquement selon leur densité scanner.

- Cette technique permet de sélectionner et de révéler spécifiquement certains matériaux en fonction de leur composition atomique, notamment les structures riches en calcium et en phosphates.
- Les foyers présentant un Z-effectif élevé (autour de $Z=15$) correspondent probablement à des structures embryonnaires initialement osseuses, secondairement fossilisées par remplacement minéral phosphaté (principalement phosphate de calcium).
- La cartographie en Z-effectif améliore ainsi la distinction entre reliquats embryonnaires fossilisés et matrice sédimentaire environnante, même lorsque leurs densités sont proches en tomodensitométrie conventionnelle.
- La distribution non aléatoire de ces structures hyperminéralisées constitue un argument en faveur de véritables reliquats embryonnaires fossilisés.

Reconstruction à 65 keV

- **Améliore le contraste interne** : permet de mieux distinguer les structures embryonnaires du sédiment environnant en réduisant l'influence des différences de composition minérale.
- **Réduit les artefacts** : limite notamment les effets de durcissement de faisceau et d'hétérogénéité, ce qui facilite l'interprétation des structures internes et la reconnaissance d'éléments organisés compatibles avec une ossification embryonnaire.



La cartographie en Z-effectif met en évidence la composition (zones riches en calcium), tandis que la reconstruction à 65 keV améliore le contraste structural, permettant ensemble d'identifier de possibles reliquats embryonnaires. La comparaison avec un embryon d'autruche de 31 jours montre un regroupement osseux similaire au pôle obtus, suggérant que l'embryon fossile de dinosaure était à un stade avancé (65–72 jours, soit 80–90 % d'une incubation estimée à 80 jours).

DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

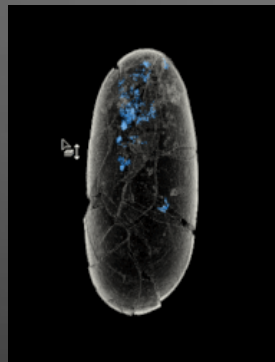
-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Comparaison – Scanner conventionnel vs. Scanner spectral pour la détection de reliquat embryonnaires

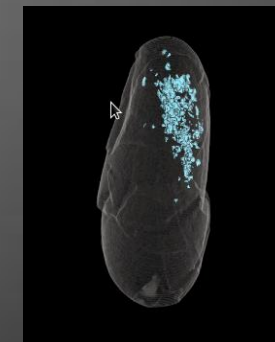
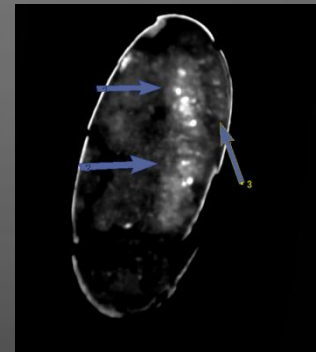
SCANNER CONVENTIONNEL

- Calcifications visibles si suffisamment minéralisées
- Contraste os/matrice souvent limité, en particulier dans le matériel fossile.
- Les structures de petite taille sont mal visualisées en raison de la résolution limitée
- Largement disponible



SCANNER SPECTRAL (GE REVOLUTION APEX CT)

- Calcification visible à des niveaux d'énergie plus bas (ex. 65 keV).
- Amélioration du contraste os/matrice grâce à une meilleure séparation des matériaux à numéro atomique élevé (high-Z).
- Visualisation plus fine des détails structuraux et meilleure délimitation des reliquats fossilisés subtils
- Moindre disponibilité



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure "l'imposteur"

Cas n°3 : cet œuf de dinosaure est étiqueté comme œuf de Titanosaure –Megaloolithus

Origine: Auca Mahuevo, Argentine

Le diamètre (**18 cm**) est compatible avec un œuf de titanosaure argentin.

Toutefois, ces œufs sont habituellement **écrasés**, la conservation tridimensionnelle étant **rare**.

La **matrice rouge oxydée** est **inhabituelle** dans les bassins fluvio-lacustres argentins.

Le **motif de la coquille** n'est pas compatible avec celui des titanosaures d'Argentine.

Comment le scanner permet-il de confondre une imposture ?



Exemple de référence d'un œuf de titanosauridé du site d'Auca Mahuevo (Argentine)

DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Ouf de dinosaure

ANALYSE SEMIOLOGIQUE

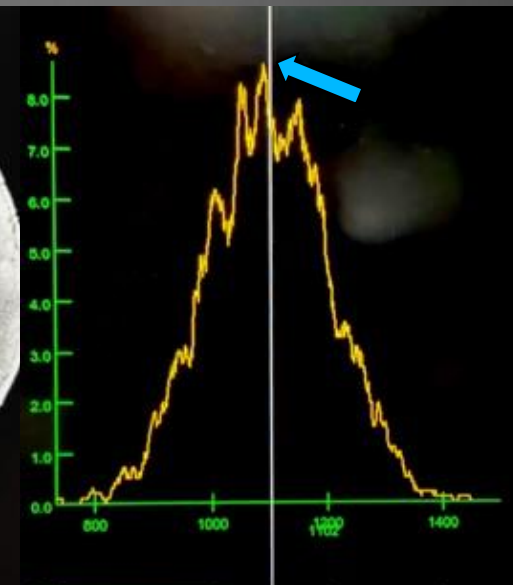
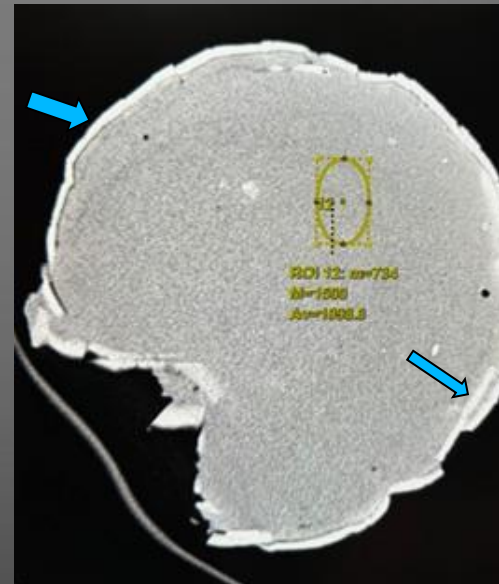
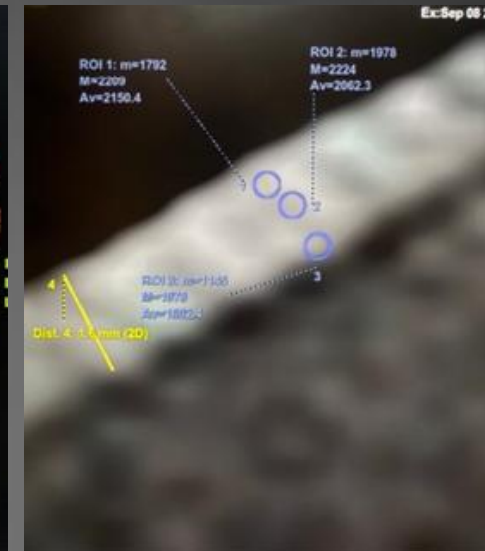
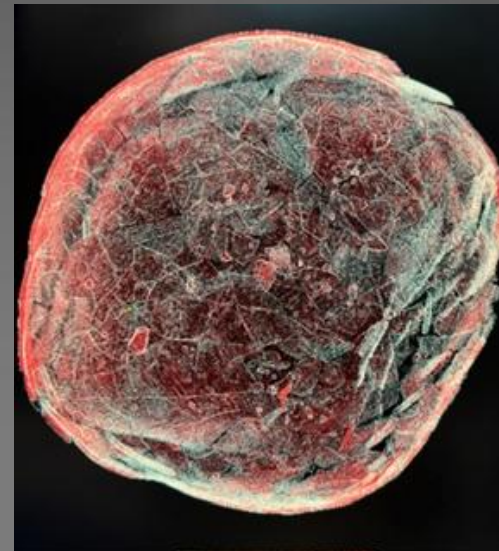
- La fragmentation de la coquille, l'absence de plans de collage et la continuité matrice-coquille confirment qu'il **s'agit d'un œuf fossile véritable**, non reconstitué.

- Dans les contextes argentiens à œufs de titanosaure, la matrice est **classiquement fortement diagenisée, avec des densités très élevées, généralement comprises entre ~2200 et 3000 UH**, liées à une **cimentation avancée** et à une **recristallisation** importante. Les histogrammes de densité attendus sont larges et hétérogènes, traduisant une matrice fortement structurée, avec des variations locales de cimentation et de porosité résiduelle.

- À l'inverse, la matrice analysée présente des **densités plus faibles, de l'ordre de ~1100–1200 UH**, associées à un spectre resserré et homogène, sans valeurs élevées ni dispersion marquée, traduisant une matrice plus uniformément lithifiée.

- Cette opposition conjointe des densités et des distributions spectrales est incompatible avec une matrice argentine et oriente vers une matrice silicoclastique continentale de type *red beds*, cohérente avec certains bassins crétacés chinois.

- Parmi les types d'œufs chinois de grande taille connus, l'ensemble des critères morphologiques et structuraux est **compatible avec *Stalicoolithus***.

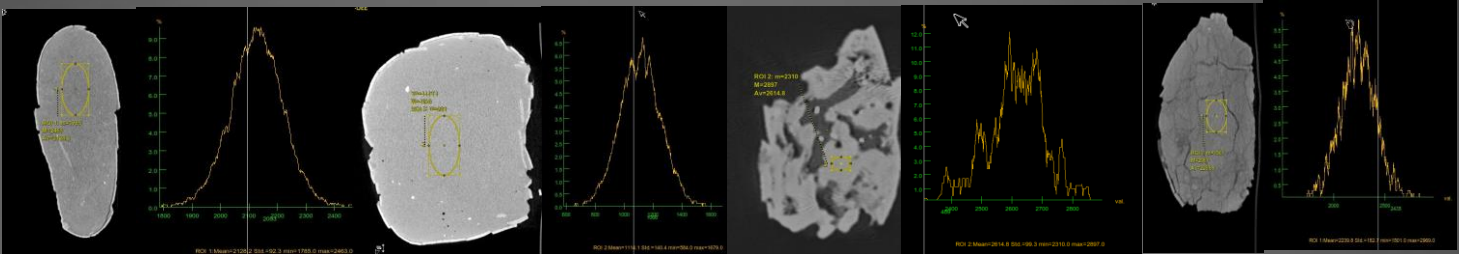


DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-70 à 80 millions d'années

Œuf de dinosaure

Exemples de signatures petro-scanner et contextes de fossilisation d'œufs de dinosaures



Type d'oeuf	Elongatoolithus (Nanxiong)	Stalicoolithus (Jiangxi)	Megaloolithus (Allen, Argentine)	Cairanoolithus (Provence)
Morphologie générale	Allongé, asymétrique	Sphéro-ovoïde, volumineux	Sphéroïde à sub-sphéroïde, volumineux	Ovoïde
Dinosaure probable	Oviraptorosaures	Dinosaures asiatiques non-oviraptoridés	Sauropodes (Titanosauria)	Sauropodes ou apparentés
Provenance	Nanxiong (Ganzhou, Chine)	Jiangxi (Chine)	Argentine (bassins crétacés Allen formation)	Roque Haute, Sainte-Victoire (France)
Contexte sédimentaire	Dépôts continentaux fins, parfois volcano-lacustres	Formations continentales rouges oxydées	Dépôts continentaux carbonatés, fortement diagenisés	Dépôts carbonatés continentaux
Densité matrice (UH)	1000–1200	1100–1200	2200–3000	≈ 2100–2300
Histogramme	Large, parfois bimodal	Resserré, homogène	Large, hétérogène, avec dispersion des valeurs	Large, centré haut
Lecture petro -scanner	Matrice hétérogène, diagenèse variable	Red beds bien lithifiées	Matrice fortement cimentée et recristallisée , hétérogénéité liée à une diagenèse avancée	Calcaires fortement cimentés
Intérêt diagnostique	Contexte chinois compatible	Contexte chinois cohérent	Signature argentine caractéristique , distincte des <i>red beds</i> asiatiques	Contexte européen distinct

DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-125 millions d'années

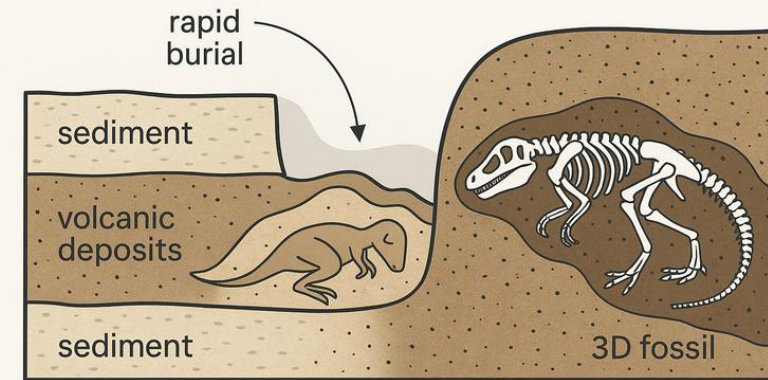
Fossile de dinosaure

Préservation tridimensionnelle des fossiles dans le « Pompéi chinois » (couche de Lujiatun, Formation de Yixian, Chine)

Alors que la plupart des fossiles se présentent **sous une forme aplatie** en raison de la pression des sédiments et des transformations géologiques, la couche de Lujiatun offre une **préservation tridimensionnelle exceptionnelle**, avec des squelettes encore articulés et parfois figés dans des attitudes proches de la vie.

Cette conservation remarquable s'explique par une **éruption volcanique brutale**, qui a rapidement enseveli les organismes sous les cendres. Celles-ci ont formé une **enveloppe protectrice**, empêchant la dégradation habituelle (charognage, décomposition, écrasement) et permettant une **conservation anatomique**.

3D Fossilization in the Lujiatun Layer, Yixian Formation



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-125 millions d'années

Fossile de dinosaure

Cas n° 4 : Fossile de dinosaure—*Jeholosaurus shangyuensis* juvenile (- 125 MA)

Origine: Couche de Lujiatun, Formation de Liaoxi (Liaoning, Chine)

Ce dinosaure fossile montre une préservation tridimensionnelle exceptionnelle, avec un squelette complet, articulé et figé dans une posture de vie.

La plupart des fossiles de dinosaures sont retrouvés aplatis ou fragmentés sous la pression sédimentaire accumulée sur des millions d'années.

Une telle conservation, extrêmement rare, soulève la question de l'authenticité.

Se pourrait-il qu'il s'agisse d'une réplique ?

Le spécimen a-t-il été restauré ?

Si le spécimen est authentique, est-il possible de générer un modèle 3D complet à l'aide d'un scanner?



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

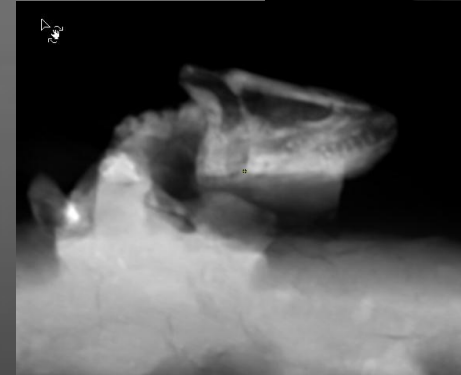
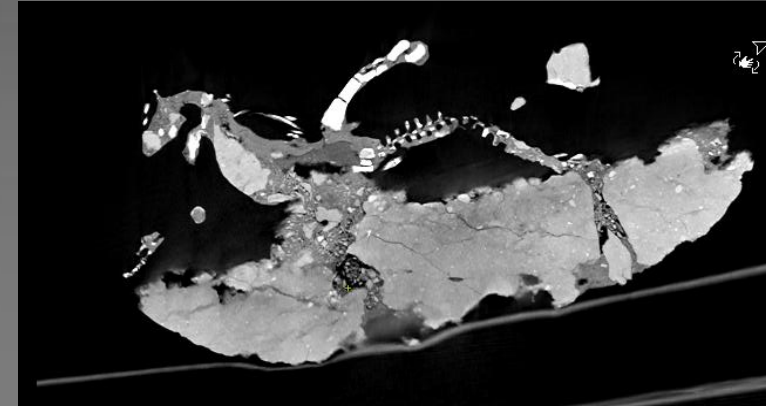
-125 millions d'années

Fossile de dinosaure

ANALYSE SEMIOLOGIQUE D'UN FOSSILE AUTHENTIQUE

- Les os présentent une **densité minérale homogène, sans ligne** de colle, restauration artificielle ou discontinuité.
- Le squelette est articulé dans une position anatomique naturelle, **sans signe de désarticulation ni de repositionnement**.
- **Les structures fines** telles que les apophyses neurales, les côtes et les dents sont bien préservées et **nettement visibles**.
- Les plages d'hyperclarté gazeuse observées dans les faux trilobites correspondent à un vide sous moulage, alors que dans ce Jeholosaurus, elles s'expliquent par **des fractures sédimentaires naturelles (diaclasses)** dans le tuf volcanique de Lujiatun, formées lors du refroidissement et de la compaction de la matrice cendreuse.
- **La matrice reste en contact direct** avec les os, sans matériau étranger ni comblement synthétique détecté.

Ces éléments confirment que le spécimen est authentique, non restauré et préservé dans son contexte d'enfouissement original, avec des structures géologiques naturelles visibles au scanner.



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-125 millions d'années

Fossile de dinosaure

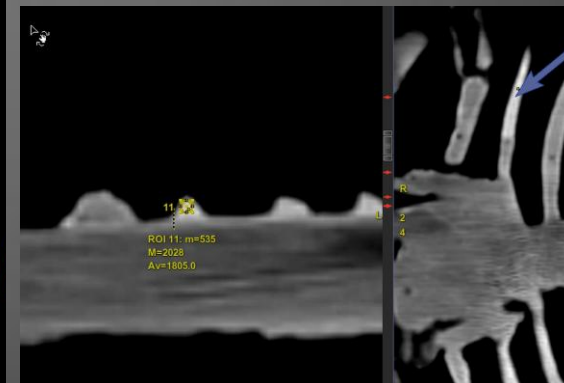
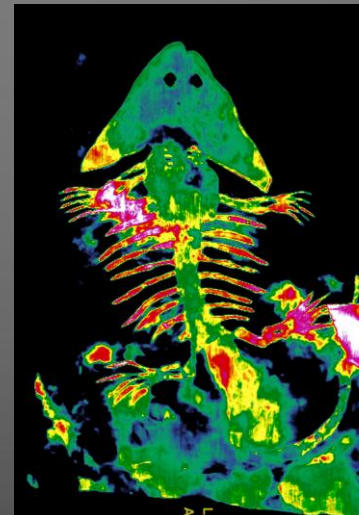
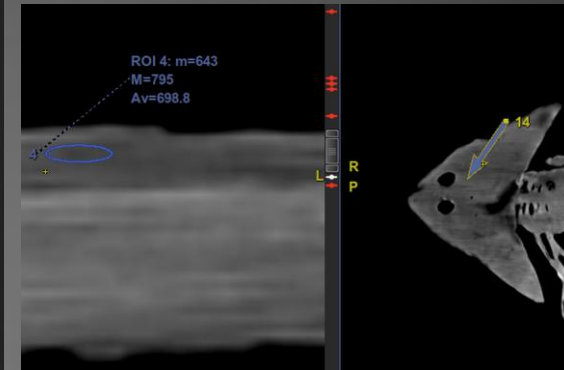
ANALYSE SEMIOLOGIQUE D'UN FOSSILE COMPOSITE FALSIFIÉ

Fossile ayant l'apparence d'un **Diplocaulus** du Jehol Biota, attribution incompatible avec son âge et sa provenance supposée, motivant l'analyse scanner.

Au sein de la **silhouette du fossile**, distinction de deux composantes densitométriques discordantes.

- Les zones de **faible densité**, autour de **670–700 UH**, correspondent aux **parties possiblement reconstituées** (tête élargie, tronc partiel et queue), homogènes, sans architecture osseuse interne identifiable, compatibles avec un **matériau composite ajouté**.
- Les zones de **forte densité**, autour de **1500 UH ou plus**, correspondent aux **fragments potentiellement fossiles** — principalement certains éléments des membres et des côtes, compatibles avec des éléments minéralisés.

La **cartographie de densité** met en évidence en rouge les zones dont l'atténuation dépasse 1500 UH, correspondant aux seuls fragments authentiquement fossilisés — ceux-ci ne représentent qu'une fraction de la silhouette visible, le reste étant constitué de matériau de faible densité.



DEUXIÈME ARRÊT : LE CRÉTACÉ, LE TEMPS DES DINOSAURES

-125 millions d'années

Fossile de dinosaure

DU SCANNER AU MODÈLE 3D

À partir des données de scanner, le squelette fossile peut être virtuellement isolé de la matrice environnante.

Les structures osseuses sont segmentées à l'aide des outils de sélection manuelle du logiciel **GE AW Server**, permettant une extraction précise basée sur la morphologie et la continuité spatiale.

Cette dissection numérique dispense de toute préparation mécanique et garantit la conservation complète du spécimen.

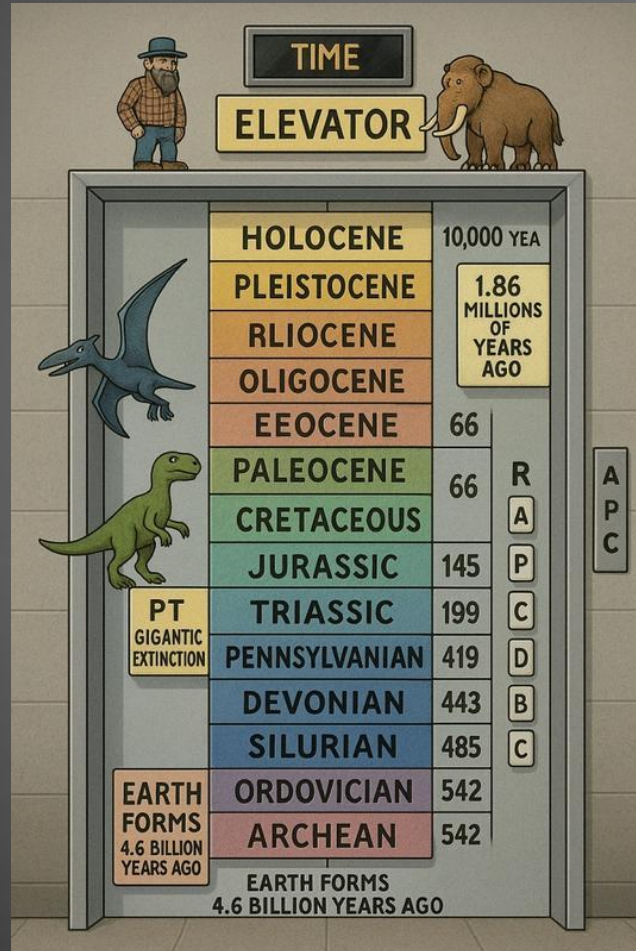
Le modèle 3D obtenu peut ensuite être exporté au format **STL** depuis le GE AW Server pour l'impression 3D ou l'analyse morphométrique.



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

il y a 10 000 ans

Défense de mammoth



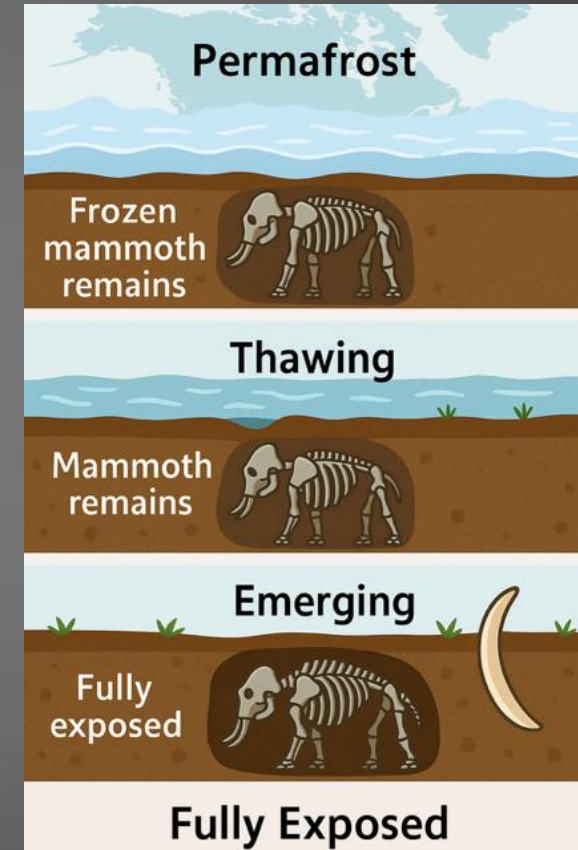
TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

il y a 10 000 ans

Défense de mammoth

Prisonniers du temps :

- Le pergélisol est un sol gelé en permanence dans les régions arctiques.
- De nombreux restes de mammoths (défenses, os, tissus mous) y ont été préservés comme dans un congélateur naturel pendant des dizaines de milliers d'années.
- Les basses températures et l'absence d'oxygène limitent la décomposition, permettant une conservation exceptionnelle.
- Aujourd'hui, le réchauffement climatique entraîne la fonte du pergélisol, révélant plus fréquemment des spécimens de mammoths remarquablement bien conservés.



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

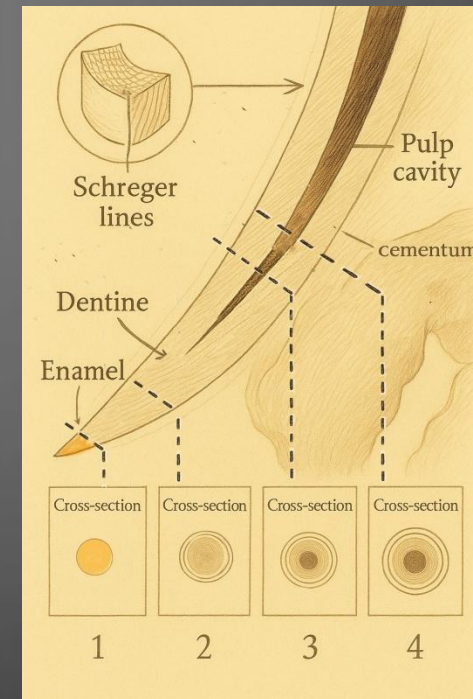
il y a 10 000 ans

Défense de mammoth

Le mammoth laineux (*Mammuthus primigenius*) a vécu durant le Pléistocène et s'est éteint il y a environ 10 000 ans.

Ses défenses sont des incisives supérieures allongées composées principalement de dentine (ivoire), entourées d'une fine couche externe de ciment:

- **Cément (écorce)** : couche externe hypodense, souvent plus sombre et irrégulière ; peut être utilisée ou absente dans les fossiles.
- **Dentine (ivoire)** : composant principal, hyperdense, organisé en couches annuelles de croissance.
- **Cavité pulpaire** : chambre centrale hypodense, anciennement vascularisée.
- Les **lignes de Schreger** sont des motifs en chevrons visibles en coupe transversale de l'ivoire, formés par l'orientation alternée des tubules dentinaires au cours de la croissance de la défense.



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

il y a 10 000 ans

Défense de mammouth

Cas n°5: portion distale d'une défense de mammouth laineux (*Mammuthus primigenius*) (Pléistocène tardif, ~10 000 ans)

Origine : Yakoutie, Russie

Les défenses de mammouth mises au jour dans le pergélisol sibérien sont généralement trouvées dans un état brut, encore humides et recouvertes de sédiments anciens.

Des spécimens intacts et bien conservés sont très rares : la plupart sont fissurés, altérés ou fragmentés.

Cette extrémité de défense, remarquablement bien préservée, soulève une double question :

Est-ce une pièce originale ?

A-t-elle subi une restauration ?



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

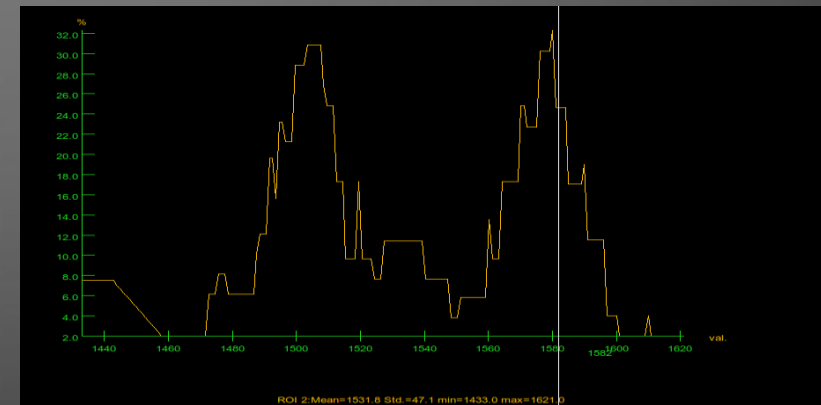
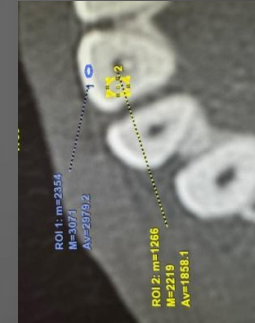
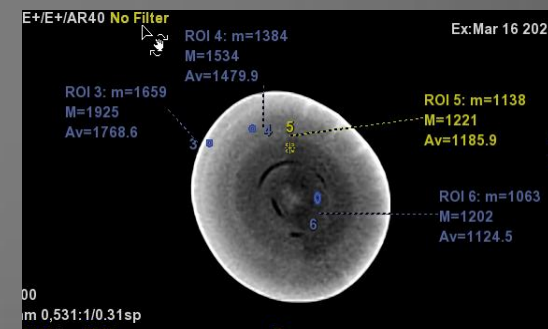
il y a 10 000 ans

Défense de mammouth

Identification de l'ivoire

- **La segmentation volumique par reconstruction 3D scanner** permet une estimation du volume. Combinée à la masse mesurée, elle autorise le calcul de la densité. La valeur obtenue ($1,6 \text{ g/cm}^3$) est caractéristique de la dentine, confirmant qu'il s'agit bien d'ivoire
- De plus, **les valeurs d'atténuation scanner** comprises entre 1400 et 1700 UH correspondent à celles de la dentine.
- **L'histogramme de densité présente une distribution bimodale**, reflet de l'alternance d'orientation des tubules dentinaires constitutifs des **lignes de Schreger**, signature caractéristique de l'ivoire, commune aux proboscidiens actuels (éléphants) et fossiles.

Les trois critères indépendants convergents confirmant la nature ivoire du spécimen



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

il y a 10 000 ans

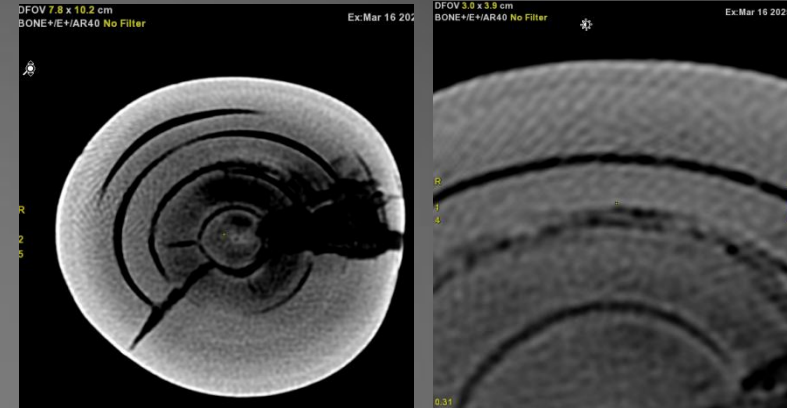
Défense de mammoth

Attribution à l'ivoire de mammoth

Le scanner TDM axial 2D met en évidence la structure interne de la dentine.

On observe des lignes qui s'entrecroisent en formant des angles **inférieurs à 90°**, correspondant aux **lignes de Schreger**, caractéristiques de l'ivoire de mammoth.

La reconstruction volumique 3D en transparence montre également les cônes de croissance concentriques, illustrant l'organisation interne naturelle de la défense.



Ci dessus: coupe virtuelle au scanner montrant les lignes de Schreger dans l'ivoire de la défense de mammoth.

Ci dessous: coupe physique de l'extrémité de la défense avec les motifs en lignes de Schreger.



TROISIÈME ÉTAPE : LE PLÉISTOCÈNE

il y a 10 000 ans

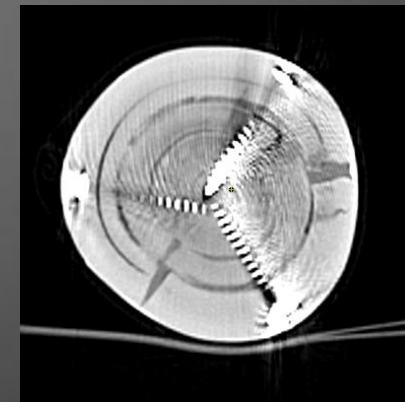
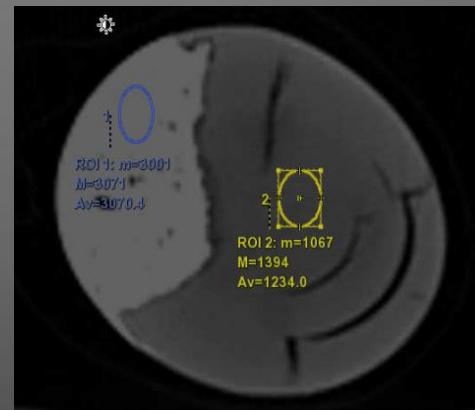
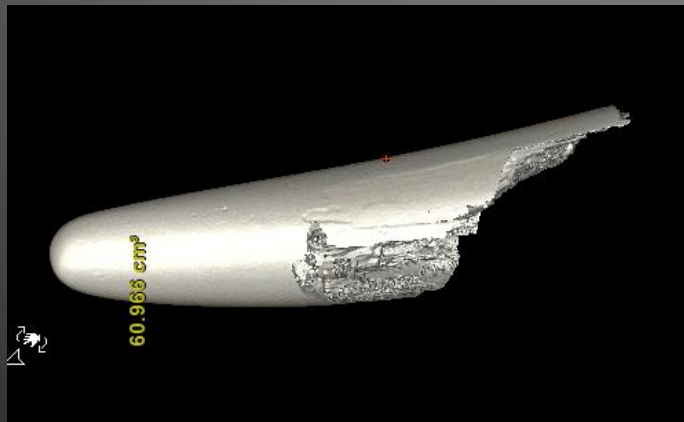
Défense de mammouth

Indices de restauration ?

- L'imagerie scanner révèle la **présence de vis de stabilisation** à la base de la section de défense.
- Un **matériau de comblement dense** est également visible près de l'extrémité de la défense, juste sous la couche externe (cément).
- Le volume de restauration est estimé à environ **60 cm³**, soit environ **5 % du volume total de la défense**.



Ci-dessus: la reconstruction 3D en transparence met en évidence des vis de stabilisation à la base et un matériau dense de comblement à l'extrémité, également visible sur la coupe tomodensitométrique ci-dessous.



MÉTHODE D'ANALYSE SCANNER D'UN FOSSILE

1. Morphologie et cohérence structurale

Analyser la forme générale, la continuité des structures et leur organisation.
Pour un œuf : courbure, épaisseur et emboîtement des fragments de coquille.
Pour un squelette : cohérence anatomique et articulation des pièces osseuses.

2. Densité du fossile

Mesurer les densités des structures minéralisées : coquille, os, dentine ou fragments fossiles.
Rechercher une hiérarchie cohérente entre fossile, matrice naturelle et matériaux rapportés.

3. Interfaces

Étudier le contact entre le fossile et la matrice.
Une transition progressive évoque un contact naturel.
Une limite nette ou une bande hypodense fait suspecter colle, résine, ciment ou restauration.

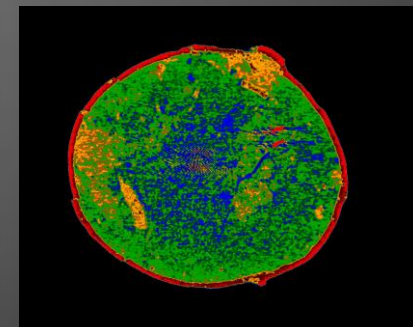
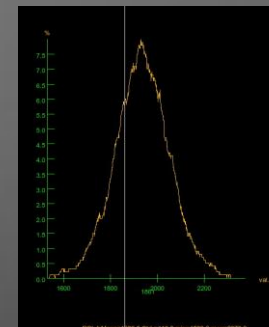
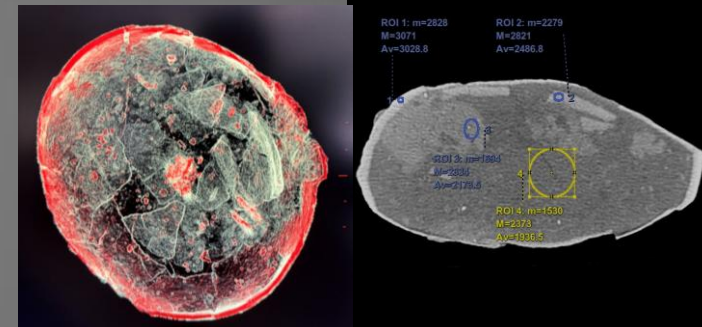
4. Matrice

Analyser la matrice interne de l'œuf ou la matrice environnante du fossile.
Une texture hétérogène et sédimentaire est attendue dans un remplissage naturel.
Une matrice homogène ou artificiellement régulière évoque un matériau rapporté.

5. Histogramme et cartographie de densité

L'histogramme objective la distribution des densités.
La cartographie de densité aide à localiser les zones restaurées ou suspectes.

Aucun critère isolé ne suffit : la conclusion repose sur un faisceau d'arguments morphologiques, densitométriques et contextuels.



CE QUE L'ÉTUDE DES FOSSILES APPORTE À LA PRATIQUE QUOTIDIENNE DU RADIOLOGUE

Comment l'imagerie fossile affine l'interprétation du scanner

1. Affiner la perception des variations de densité

L'étude des fossiles exerce l'œil du radiologue à reconnaître des différences discrètes d'atténuation et d'utiliser l'histogramme de densité et la cartographie couleur de densité, utiles au diagnostic précoce d'ischémie, d'œdème médullaire, composante graisseuse d'un nodule surrénalien ou de lésions infiltrantes.

2. Renforcer l'évaluation de la continuité osseuse

Le suivi des lignes de fracture ou des reliquats minéralisés affine les compétences dans l'exploration des traumatismes et le contrôle post-opératoire.

3. Reconnaître les corps étrangers et les matériaux de comblement

L'identification de résine, d'adhésifs ou de consolidants dans les fossiles fait écho à la détection de ciment chirurgical, de complications liées au matériel ou de signes d'usure prothétique.

4. Renforcer l'expertise en segmentation et outils avancés 3D

L'analyse de fossiles incite à exploiter pleinement la segmentation, les reconstructions multiplanaires et les applications de rendu volumique, compétences directement transposables à l'imagerie musculosquelettique, au traumatisme et à la planification interventionnelle.

5. Comprendre et utiliser l'imagerie spectrale

L'application de l'imagerie spectrale aux fossiles avec la décomposition des matériaux et la cartographie du numéro atomique favorise une meilleure maîtrise de ces techniques, transposables en clinique pour la détection des hémorragies, des calculs d'acide urique ou l'évaluation des prises de contraste iodées.



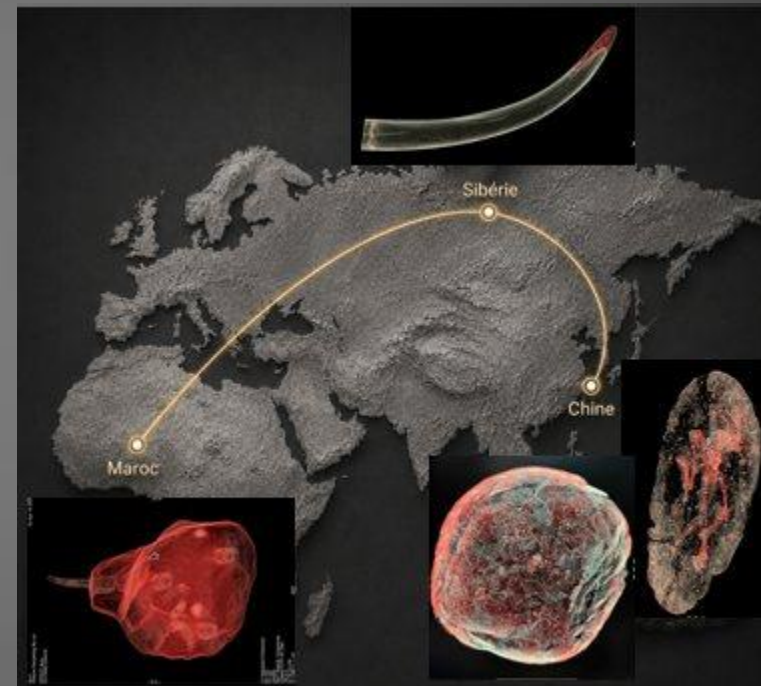
TERMINUS, TOUT LE MONDE DESCEND !

Conclusion de notre voyage.

Grâce à l'imagerie scanner, nous avons voyagé à travers le temps et l'espace, du Maroc à la Sibérie, en passant par la Chine.

À présent, alors que notre voyage touche à sa fin, voici les enseignements de ce voyage.

1. Le scanner permet d'explorer les spécimens paléontologiques de manière non invasive, en révélant leur structure interne, leur authenticité et d'éventuelles restaurations.
2. Au-delà de son champ clinique, le radiologue s'affirme comme un explorateur curieux, capable de mettre son expertise en imagerie et en interprétation au service de la connaissance et de la préservation du patrimoine de l'humanité.
3. Cette approche souligne la valeur ajoutée de son savoir-faire : observer autrement, analyser avec rigueur et offrir un éclairage original sur les vestiges du passé.



RÉFÉRENCES

- Ghysels M. *CT scan in artwork appraisal*. Art Tribal. 2003;4:116–131.
- Oakes RL, Hill Chase M, Siddall ME, Sessa JA. *Testing the impact of two key scan parameters on the quality and repeatability of measurements from CT scan data*. Palaeontol Electron. 2020;23(1):a07. doi:10.26879/942
- Burkhard H, Bode R. *Trilobitenland Marokko. Keine Angst vor Fälschungen*. Offizieller Katalog der 40. Mineralientage München; 2003:136–144.
- Corbacho J, Morrison S, Llácer S, Hammond K. *Use of CT and radiography as legal expert evidence in paleontology (trilobites of Morocco)*. Am J Life Sci. 2019;7(2):47–53.
- Corbacho J. *Latest techniques detected in the falsification of fossils*. Batalleria. 2015;22:22–28.
- Carpenter K, Hirsch KF, Horner JR, eds. *Dinosaur Eggs and Babies*. Cambridge University Press; 1994.
- Wang S, Zhang SK, Sullivan C, Xu X. *Elongatoolithid eggs containing oviraptorid embryos from the Upper Cretaceous of southern China*. BMC Evol Biol. 2016;16:67.
- Wakabayashi T, et al. *Photon-counting detector CT scan of dinosaur fossils: Initial experience*. Preprints. 2025;202504.1968.v1. doi:10.20944/preprints202504.1968.v1
- Winkens T, Christl A, Kühnel C, et al. In-ovo imaging using ostrich eggs: evaluation of physiological embryonal development on computed tomography. Acta Zoologica. 2021;103(4). doi:10.1111/azo.12400.
- Eppenberger P, et al. *CT-based age estimation of a mammoth tusk*. Radiology. 2022 Nov.
- Ábelová M. *Schreger pattern analysis of Mammuthus primigenius tusk: Analytical approach and utility*. Bull Geosci. 2008;83(2):225–232.
- CITES. *Identification guide for ivory and ivory substitutes*. Available at: https://cites.org/sites/default/files/ID_Manuals/Identification_Guide_for_Ivory_and_Ivory_Substitutes_ENGLISH.pdf
- Fossil Museum. *Fake trilobites – Spotting the fakes*. Available at: <http://www.fossilmuseum.net/collect/faket trilobites3.htm>
- Dino Fossils UK. *A guide to dinosaur eggs*. Available at: <https://www.dinofossils.co.uk/a-guide-to-dinosaur-eggs>
- Müller-Töwe IJ, Sander PM, Stein K, Hirsch KF. Computed tomography of dinosaur eggs: taphonomy, shell structure, and filling processes. Paläontologische Zeitschrift. 2002;76(1):121-164. doi:10.1007/BF02987838
- Racicot RA. Fossil secrets revealed: X-ray CT scanning and applications in paleontology. *Paleontological Society Papers*. 2017;22:21–38. doi:10.1017/scs.2017.6
- Rowe TB et al. X-ray computed tomography datasets for forensic analysis of vertebrate fossils. *Scientific Data*. 2016;3:160040. doi:10.1038/sdata.2016.40.

SOUS LA PIERRE

REGARDS CROISES ENTRE PALEONTOLOGIE ET RADIOLOGIE



LE SCANNER NE MENT PAS

Atlas illustré de l'imagerie scanner appliquée aux fossiles

JEAN CLAUDE LE VAN AN

Merci pour votre attention

Pour plus d'information vous pouvez nous contacter:

Dr. Jean Claude Le Van An
Centre de Radiologie CAPSUD
Saint Martin Boulogne - FRANCE

Drlevanan@gmail.com

Pour aller plus loin :

Sous la pierre

Regards croisés entre paléontologie et radiologie

Atlas illustré de l'imagerie scanner appliquée aux fossiles.

ISBN : 979-10-98549-71-7

Le scanner ne ment pas : il révèle ce que l'œil ne peut pas voir.