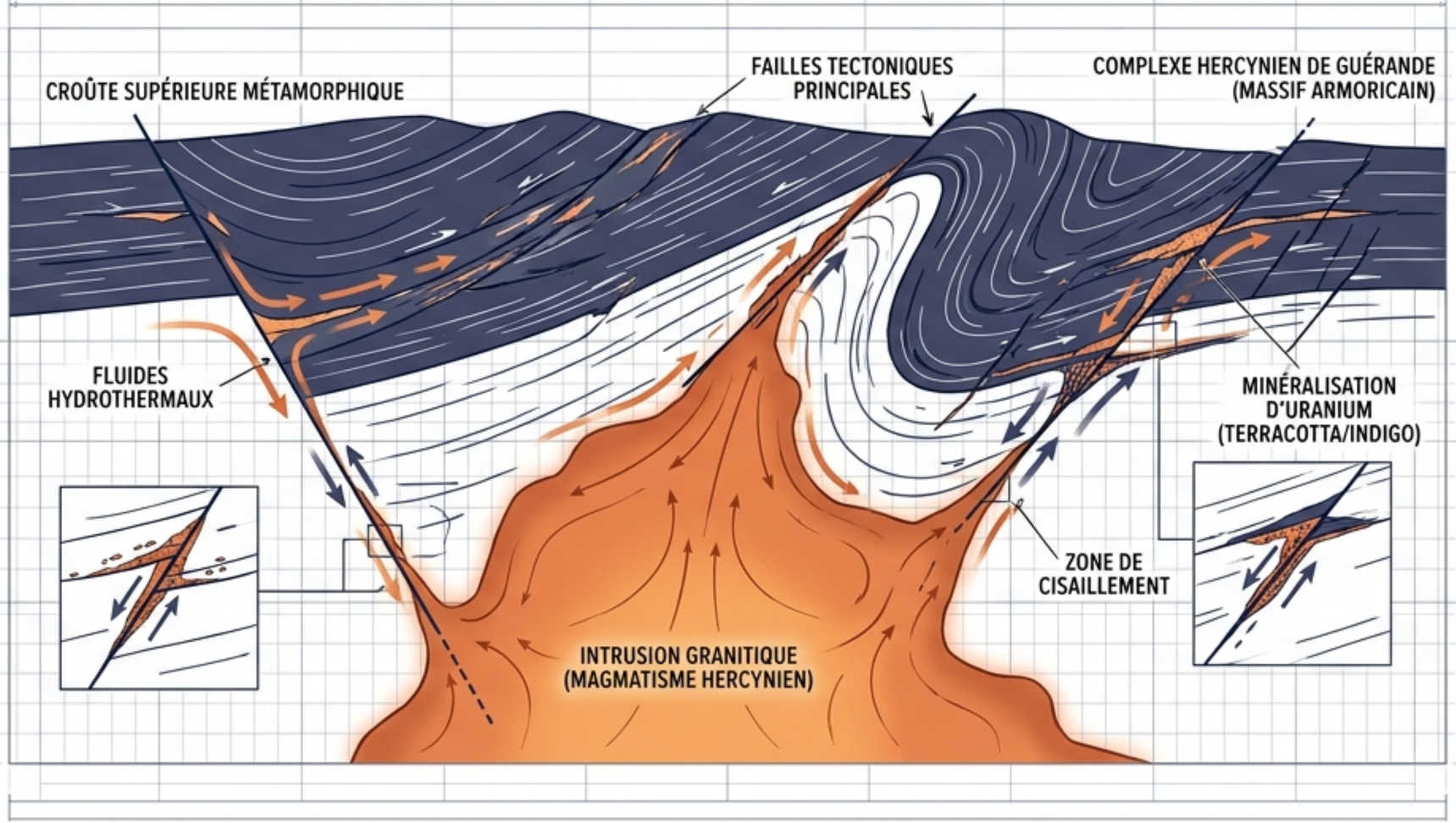
Formation des Gisements d'Uranium Hydrothermaux

Magmatisme, Tectonique et Fluides : Étude de cas du complexe Hercynien de Guérande (Massif Armoricain)



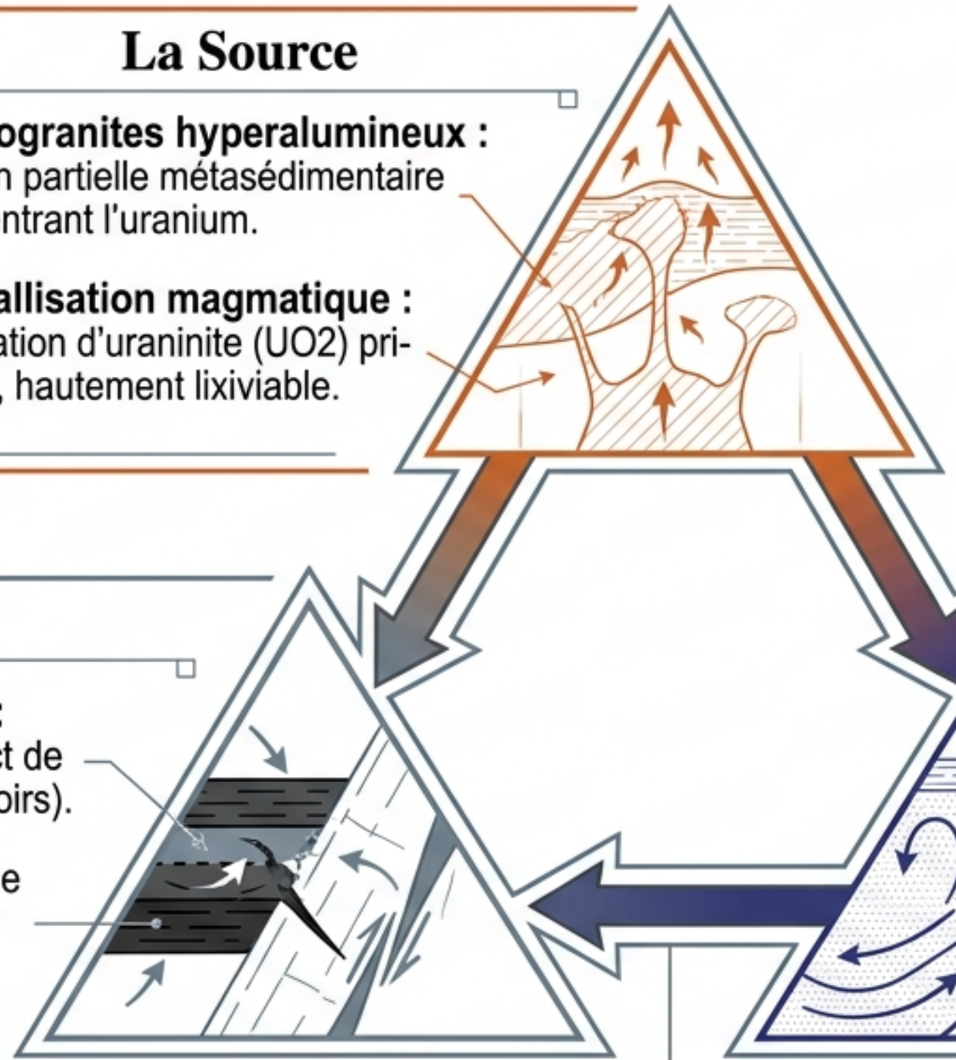
NotebookLM

Le Paradigme des Systèmes Métallogéniques

La Source

Leucogranites hyperalumineux : Fusion partielle métasédimentaire concentrant l'uranium.

Cristallisation magmatique : Formation d'uraninite (UO2) primaire, hautement lixiviable.



Le Piège

Barrières d'oxydoréduction : Précipitation chimique au contact de roches réductrices (ex: shales noirs).

Pièges structuraux : Fentes de tension et zones de cisaillement canalisant les fluides.

Le Transport

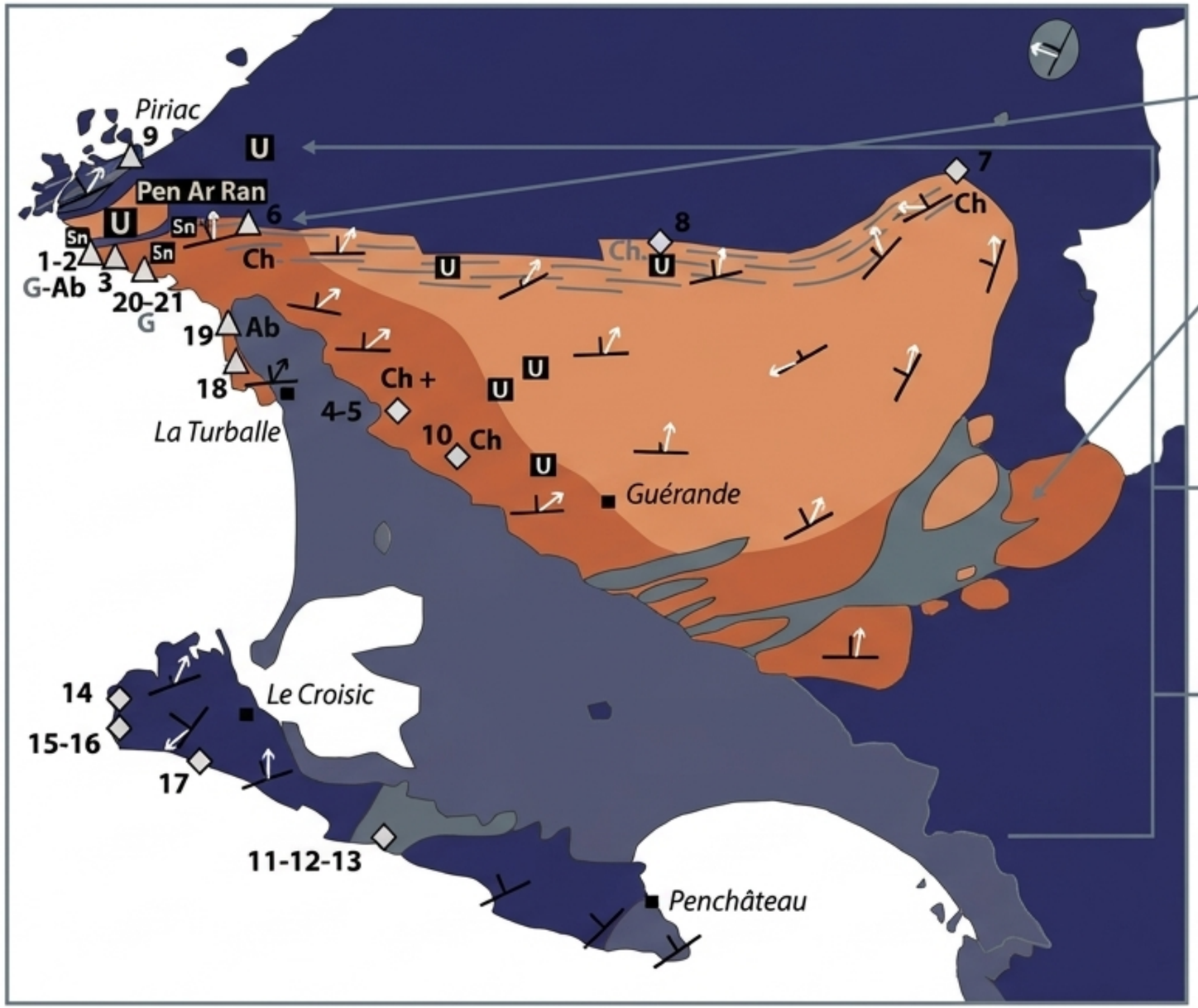
Fluides météoriques : Eaux de surface oxydantes infiltrées en profondeur.

Moteur thermique : Gradient géothermique anormal et magmatisme tardif guidant la convection via des failles tectoniques.

Ce triptyque (**Source-Transport-Piège**) guidera notre déconstruction du système uranifère de Guérande entre 310 et 275 Ma.

NotebookLM

Cadre Géologique : Le Leucogranite de Guérande



Forme et Mise en Place : Intrusion en forme de lame d'environ 1 km d'épaisseur, mise en place à ~310 Ma dans une zone de déformation en extension.

Zone d'Enracinement (Sud-Est) : Faciès isotrope, faible déformation, zone d'alimentation magmatique.

Zone Apicale (Nord-Ouest) : Faciès très évolué, déformation intense (fabriques mylonitiques et S/C), altération hydrothermale (albitisation, greisénisation).

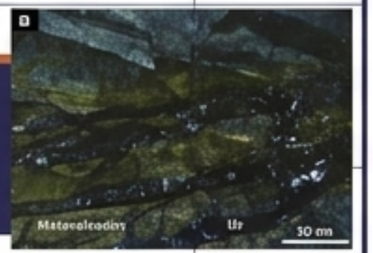
Le Graben de Piriac : Structure tectonique effondrée abritant les métavolcanites et shales noirs de la formation des Porphyroïdes de Vendée.

Le gisement principal (Pen Ar Ran) se situe stratégiquement au-dessus de la zone apicale du granite, à la frontière du graben de Piriac.

NotebookLM

Anatomie des Minéralisations : Périgranitique vs Intragranitique

Gisement de Pen Ar Ran (Périgranitique)



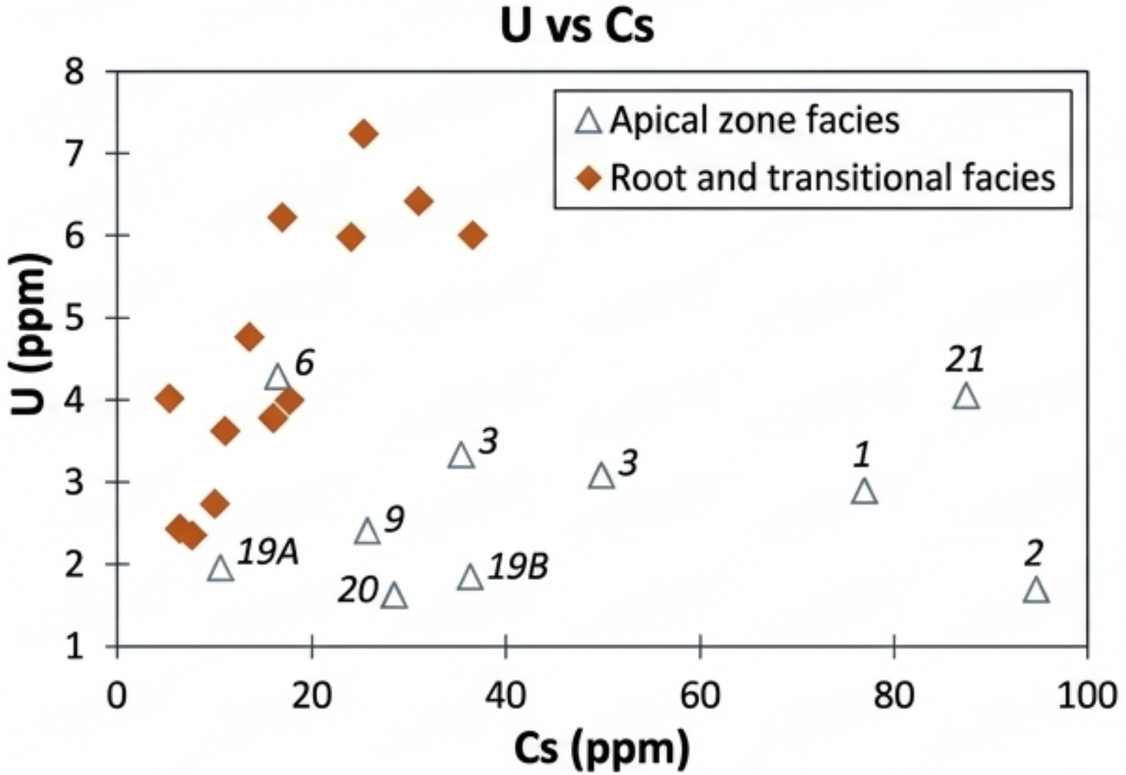
Localisation :	Extérieur au granite, dans le graben de Piriac.
Roches Hôtes :	Métavolcanites (Porphyroïdes) au contact de shales noirs réducteurs.
Contrôle Structural :	Zone de cisaillement senestre N110°, minéralisation dans des fentes de tension N90° et N70°.
Minéralogie U :	Oxydes d'uranium sphérulitiques (en peignes de quartz) et prismatiques.
Tonnage :	~600 tonnes d'uranium extraites.

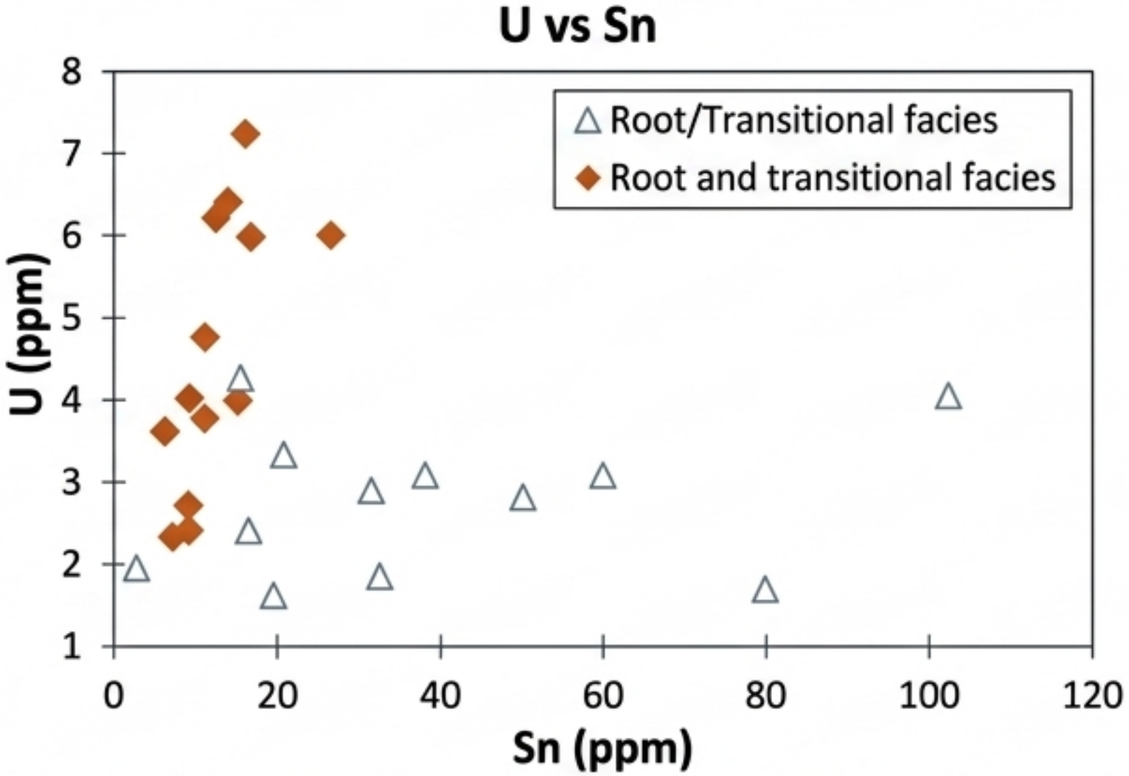
Gisement de Métairie-Neuve (Intragranitique)

Localisation :	À l'intérieur de l'intrusion granitique.
Roches Hôtes :	Filons recoupant le leucogranite et des enclaves métasédimentaires (micaschistes, quartzites graphitiques).
Contrôle Structural :	Fracturation interne à petite échelle.
Minéralogie U :	Oxydes d'uranium exclusivement prismatiques.
Tonnage :	~10 tonnes d'uranium extraites.

NotebookLM

Étape 1 : La Source Magmatique et le Paradoxe de l'Apex





L'Enrichissement Magmatique (Zone d'Enracinement)

Corrélation positive claire : l'Uranium augmente (de 2 à 7 ppm) parallèlement au Césium et à l'Étain.

Mécanisme : Cristallisation fractionnée (15-30%) et interaction avec des fluides orthomagmatiques réducteurs. L'uraninite (UO_2) cristallise lorsque le magma atteint ~10 ppm d'U.

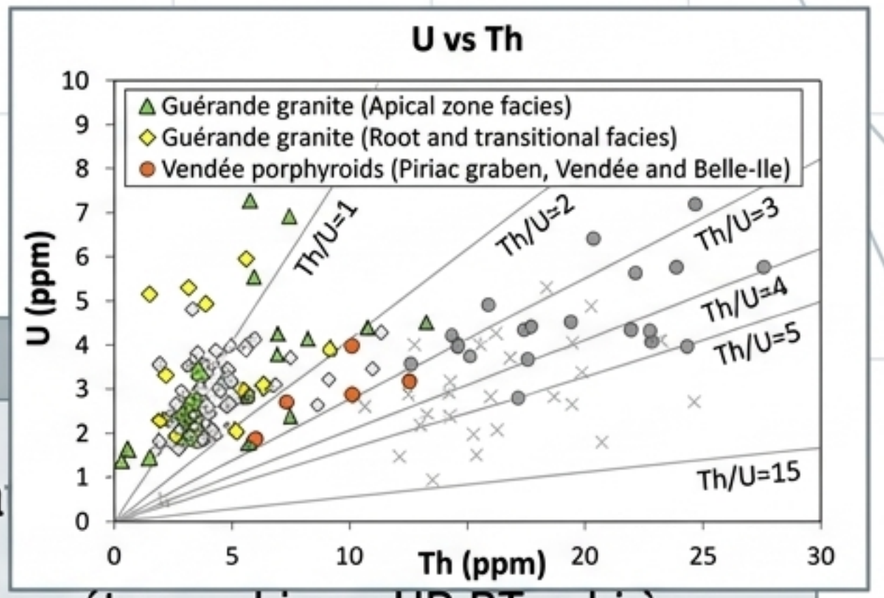
L'Anomalie de Déplétion (Zone Apicale)

Rupture de tendance : Le Césium explose (jusqu'à 100 ppm), prouvant une différenciation extrême, mais l'Uranium s'effondre (inférieur à 4 ppm).

Conclusion : L'apex hyper-différencié a cristallisé de l'uraninite primaire, mais celle-ci a été massivement dissoute et lixiviée a posteriori par des fluides.

NotebookLM

Résolution du Débat : D'où vient l'Uranium ?

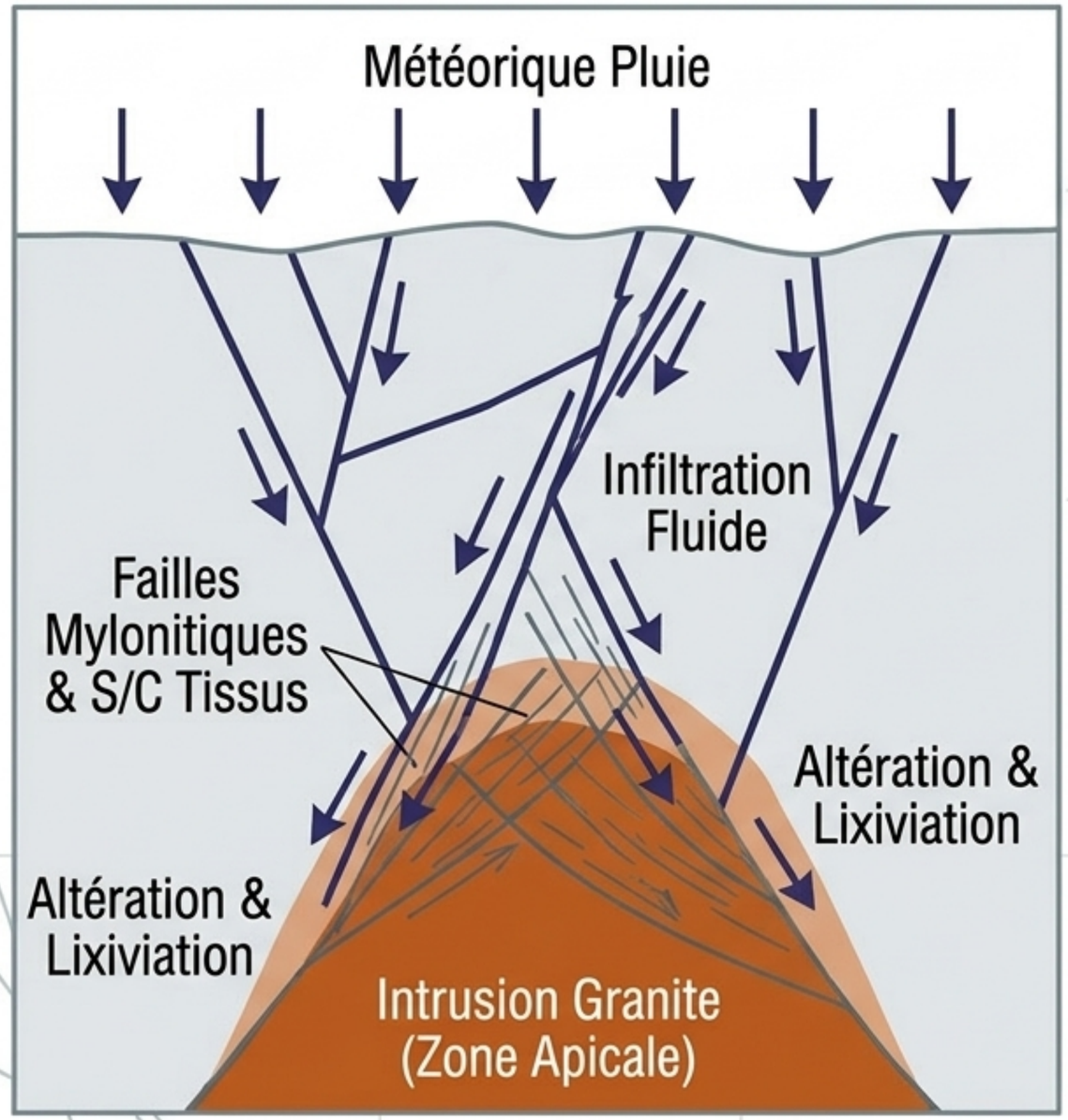


L'Hypothèse Volcanite (Rejetée)		
Roches : Porphyroïdes de Vendée (encaissant).	**Géochimie (Ratio Th/U) :** Valeurs élevées entre 2 et 5.	**Diagnostic :** Ces ratios favorisent l'incorporation de l'U dans des **minéraux réfractaires** (non lixiviables). Le métamorphisme HP-BT subi à ~360 Ma exclut la présence de verres volcaniques riches en U libre.
L'Hypothèse Leucogranite (Confirmée)		
Roches : Faciès apical déformé du granite de Guérande.	**Géochimie (Ratio Th/U) :** Valeurs très faibles (inférieures à 2, souvent <1).	**Diagnostic :** Indique que **jusqu'à 80% de l'U était sous forme d'oxydes d'uranium purs (uraninite), extrêmement instables et faciles à lixivier par des fluides oxydants.**

Le Calcul de Bilan : Une zone d'extension apicale de 2x10^8 m³ avec 20 ppm d'U initial représente une masse disponible de ~5400 tonnes d'Uranium. Largement suffisant pour former les 600 tonnes du gisement de Pen Ar Ran.

NotebookLM

Étape 2 : L'Altération Hydrothermale (La Lixiviation)



L'Infiltration Météorique

La déformation cisaillante et l'extension tectonique ont créé une perméabilité majeure (fabriques mylonitiques) au sommet de l'intrusion.

Ces discontinuités ont agi comme des drains pour les eaux météoriques (de surface) oxydantes.

Le Marqueur Isotope de l'Oxygène ($\delta^{18}O$)

Faciès non déformés : $\delta^{18}O$ roche totale = 12.2–13.6‰ (Signature magmatique normale).

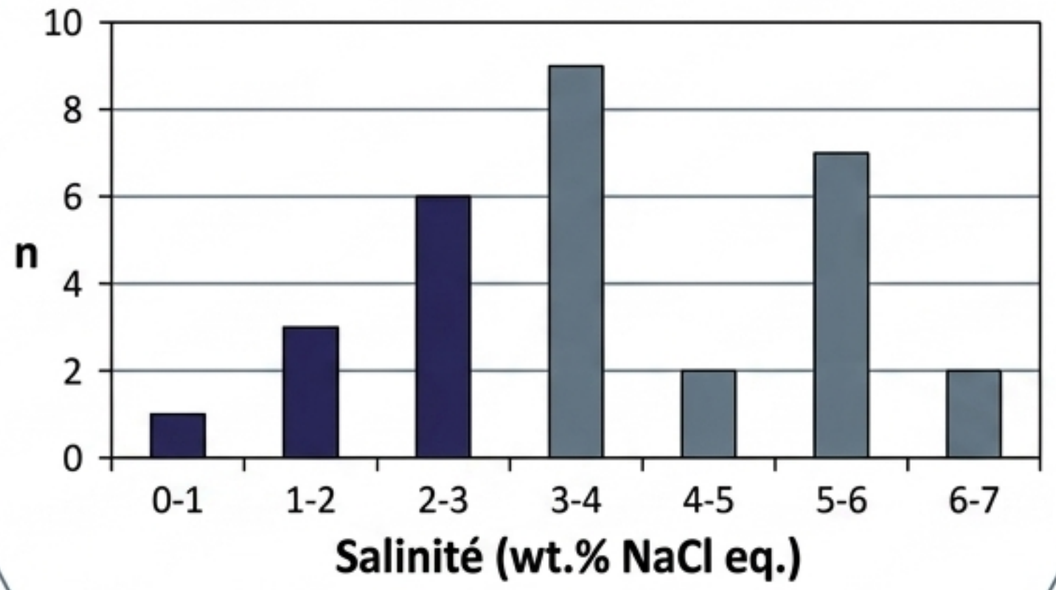
Faciès apical déformé : $\delta^{18}O$ feldspaths anormalement bas (9.7–11.6‰).

Mécanisme : Altération sub-solidus en profondeur. Les fluides météoriques oxydants ont altéré le feldspath et oxydé l'uraninite (U^{4+} insolube -> U^{6+} soluble), emportant l'uranium en solution.

NotebookLM

Les Propriétés du Fluide Minéralisateur

Un Fluide Dilué

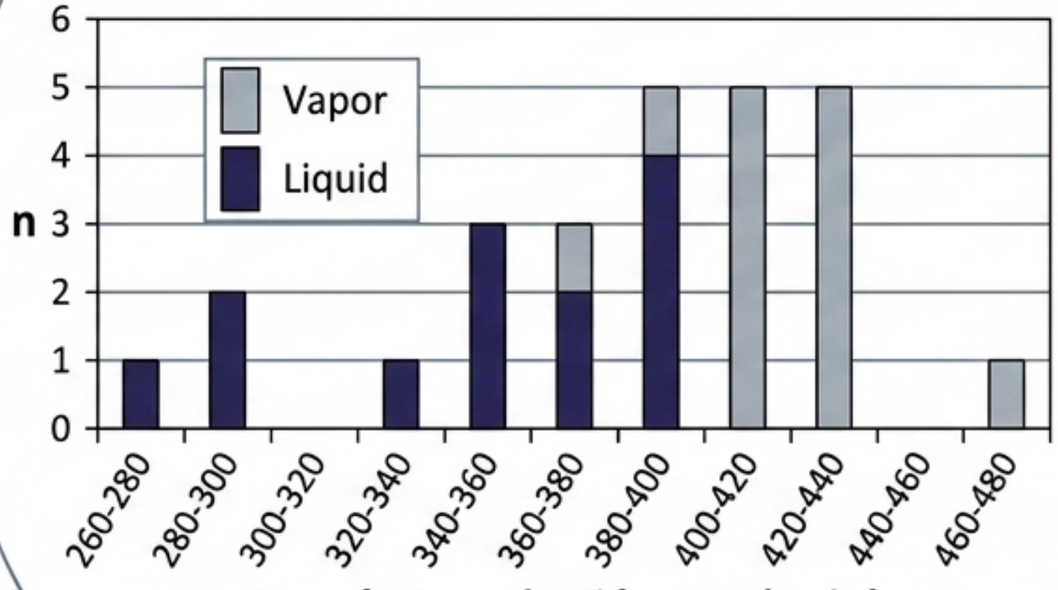


Donnée : Inclusions fluides primaires dans les peignes de quartz de Pen Ar Ran.

Résultat : Très faible salinité (1 à 6 wt.% NaCl eq.).

Interprétation : Confirme sans ambiguïté l'origine météorique (eau de pluie/surface) du fluide minéralisateur, excluant des saumures de bassin profondes.

Un Moteur Thermique Anormal



Donnée : Températures d'homogénéisation (T_h).

Résultat : Piégeage entre 250°C et 350°C.

Interprétation : Température exceptionnellement haute pour un fluide météorique. Indique un gradient géothermique régional très élevé, induit par l'amincissement crustal (extension) et l'activité magmatique résiduelle (dykes) à ~300 Ma.

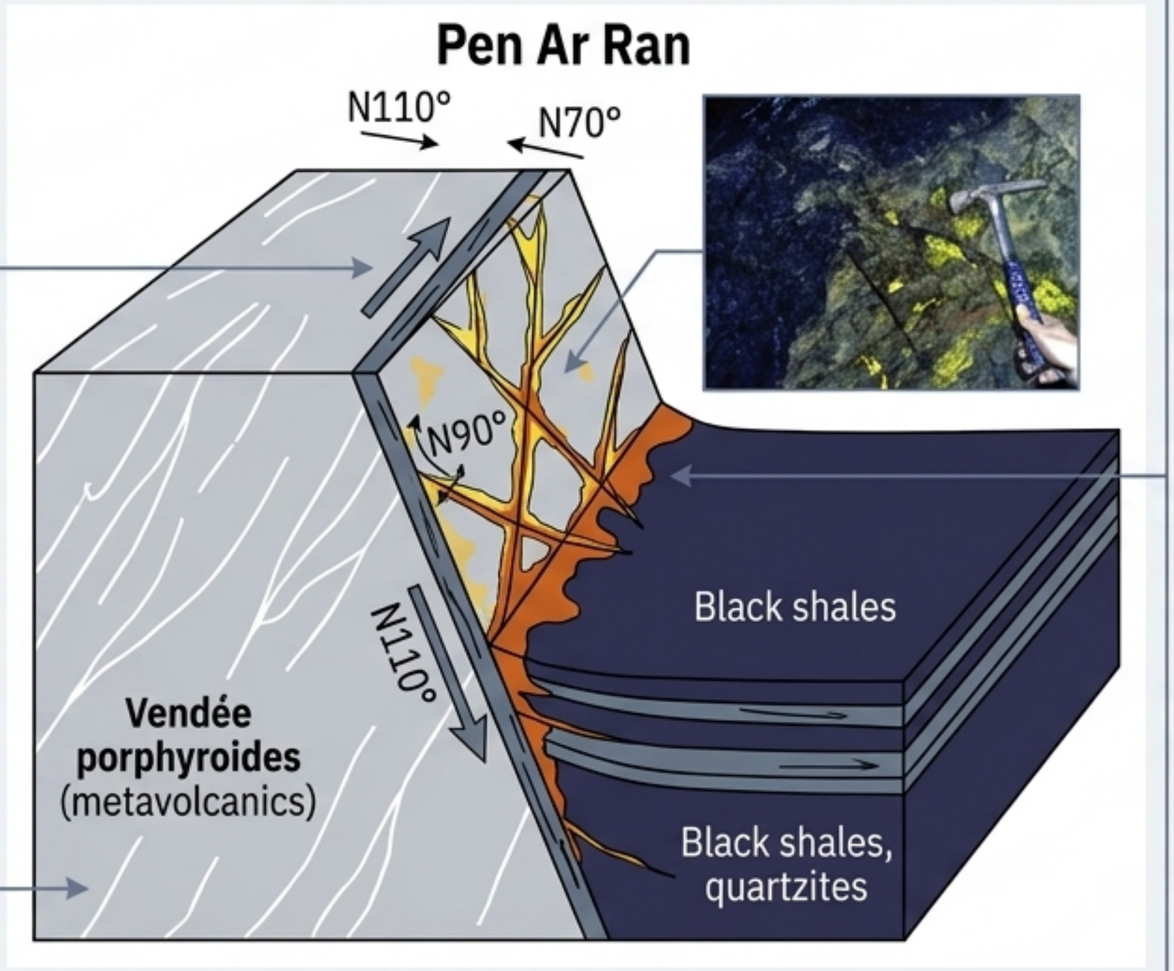
NotebookLM

Étape 3 : Le Piège Structural et Chimique

Le Piège Structural (La Plomberie)

La minéralisation est guidée par une zone de cisaillement senestre sub-verticale orientée N110°.

L'uranium précipite dans des fentes de tension (Riedel) orientées N90° et N70°, créant un réseau perméable focalisant les flux hydrothermaux.



La Barrière d'Oxydoréduction (Le Choc Chimique)

Les fluides uranifères (oxydants, transportant l'U6+ soluble) circulent dans les métavolcanites.

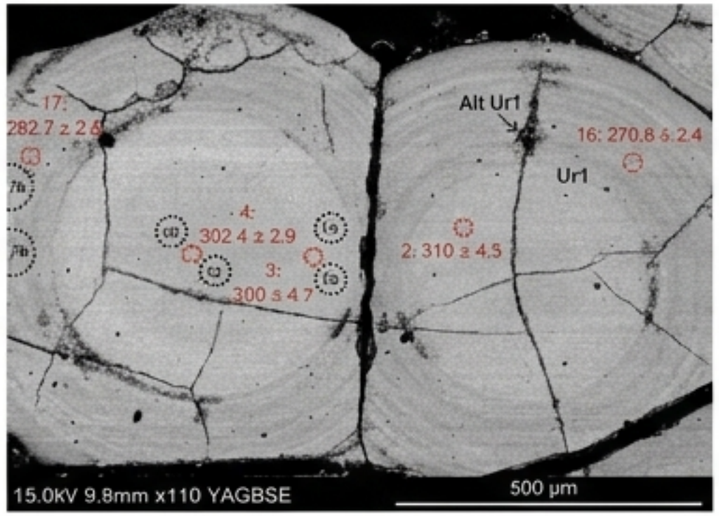
Le blocage : Les filons s'arrêtent abruptement au contact des shales noirs (schistes riches en matière organique).

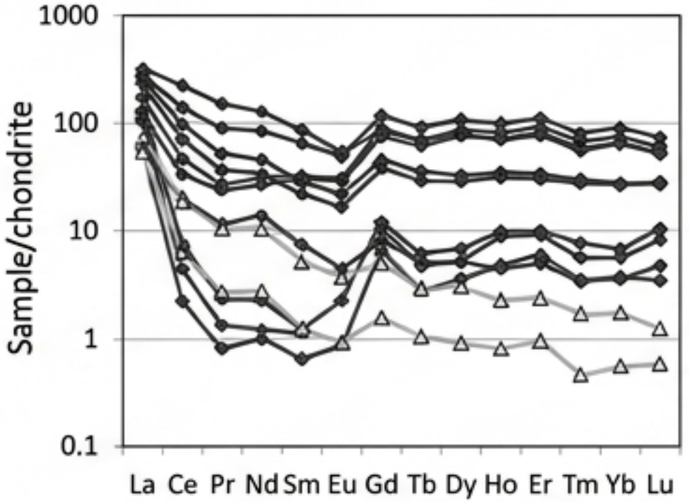
La réaction : Ce milieu hautement réducteur force la réduction immédiate de l'U6+ en U4+ insoluble, provoquant la cristallisation massive d'oxydes d'uranium (pechblende).

NotebookLM

Minéralogie : L'Empreinte des Terres Rares (REE)

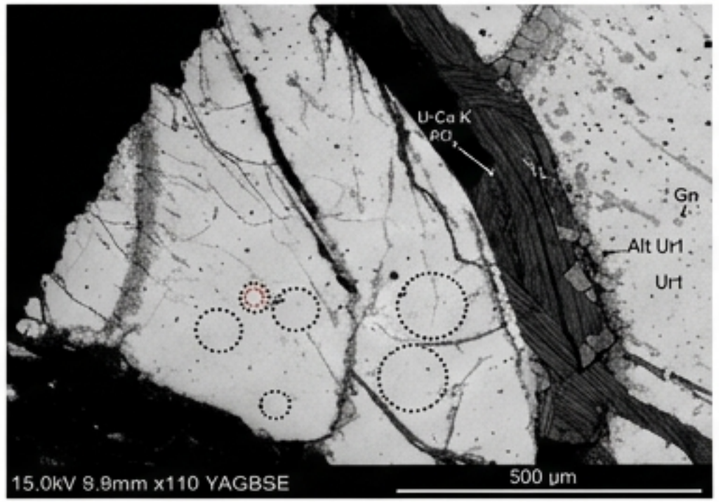
Pen Ar Ran (Sphérulitique)

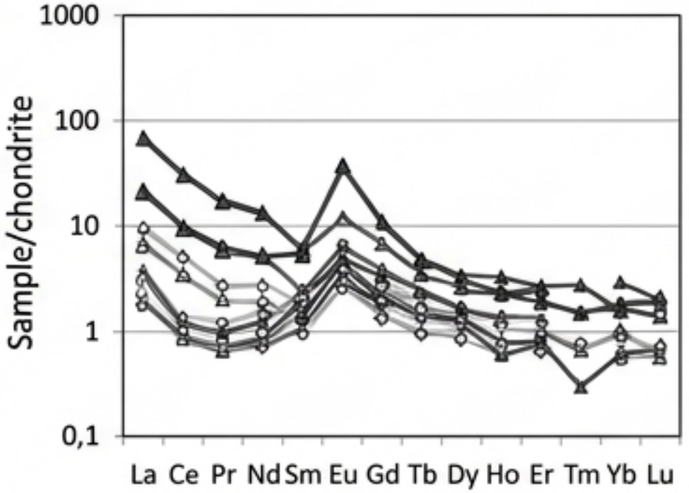




- Croissance séquentielle sur peignes de quartz.
- **Spectre REE** : Fractionnement fort des Terres Rares Légères (LREE) vers les Lourdes (HREE), avec une anomalie négative en Europium (Eu).
- **Interprétation :** Conditions typiques d'un fluide lessivant une source granitique.

Métairie-Neuve (Prismatique)

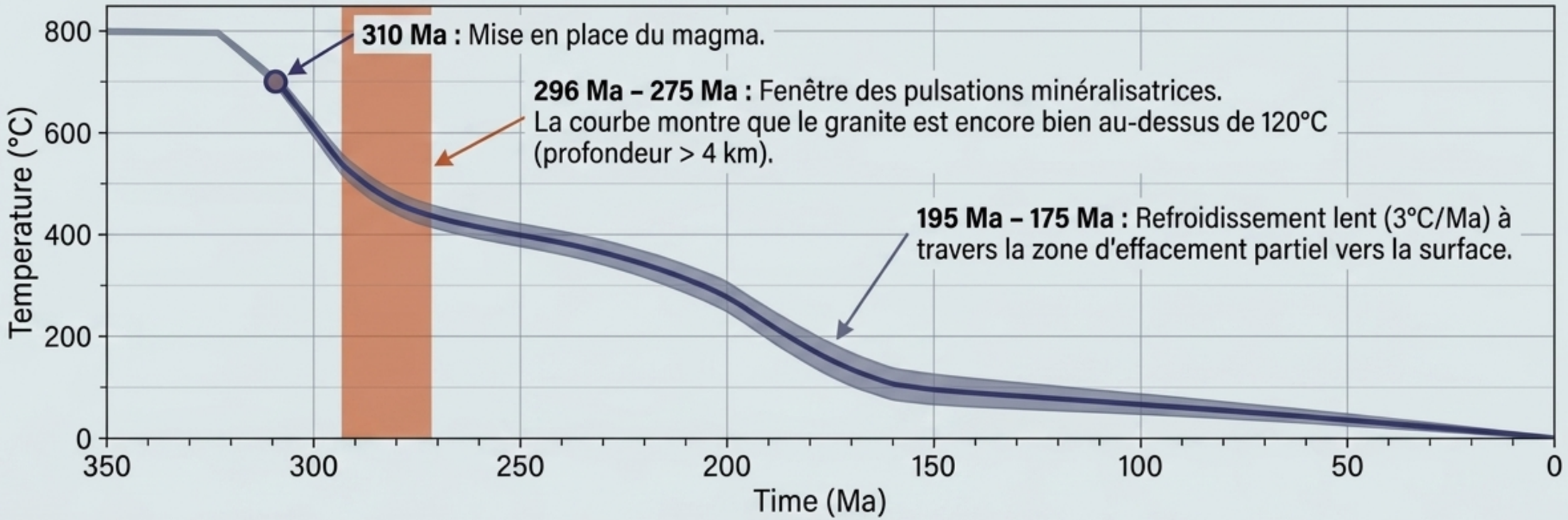




- **Spectre REE :** Apparition d'une anomalie positive en Europium.
- **Interprétation :** L'ion Eu^{2+} (trop grand) ne peut se substituer à l'U^{4+}. Cette anomalie positive indique que l'Europium était oxydé en Eu^{3+}, prouvant des conditions de précipitation beaucoup plus oxydantes dans cet environnement intragranitique.

NotebookLM

Thermochronologie : L'Histoire Thermique du Système



Un Moteur Durable

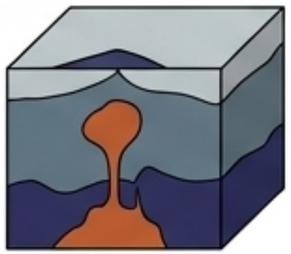
Les datations par traces de fission sur apatite (AFT) prouvent que lors de la formation des minéralisations (jusqu'à 275 Ma), **le leucogranite de Guérande était encore enfoui et chaud. Cette chaleur résiduelle a permis d'entretenir la convection des fluides météoriques pendant plus de 25 millions d'années.**

NotebookLM

Chronologie des Pulsations Minéralisatrices

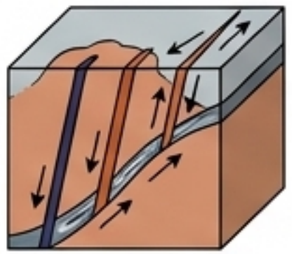
310 Ma | ~303 Ma | 296.6 ± 2.6 Ma | 286.6 ± 1.0 | 274.6 ± 0.9 | 270 Ma

310 Ma : Enracinement Magmatique



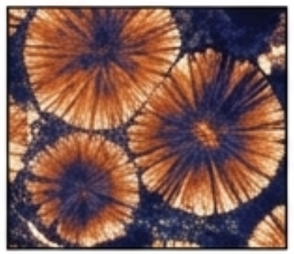
Mise en place syntectonique du granite de Guérande (U-Pb Zircon/Monazite).

~303 Ma : Réactivation et Moteur Thermique



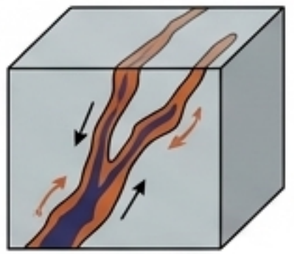
Intrusion de dykes tardifs et circulation précoce de fluides cisaillants (Ar-Ar Muscovite).

296.6 ± 2.6 Ma : Pulsation Majeure 1



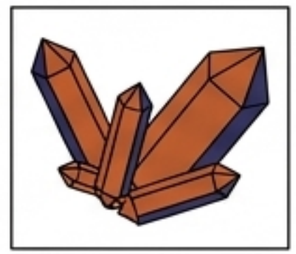
Cristallisation des cœurs sphérulitiques à Pen Ar Ran.

286.6 ± 1.0 Ma : Pulsation Intragranitique



Minéralisation des filons de Métairie-Neuve sous des conditions plus oxydantes.

274.6 ± 0.9 Ma : Pulsation Majeure 2

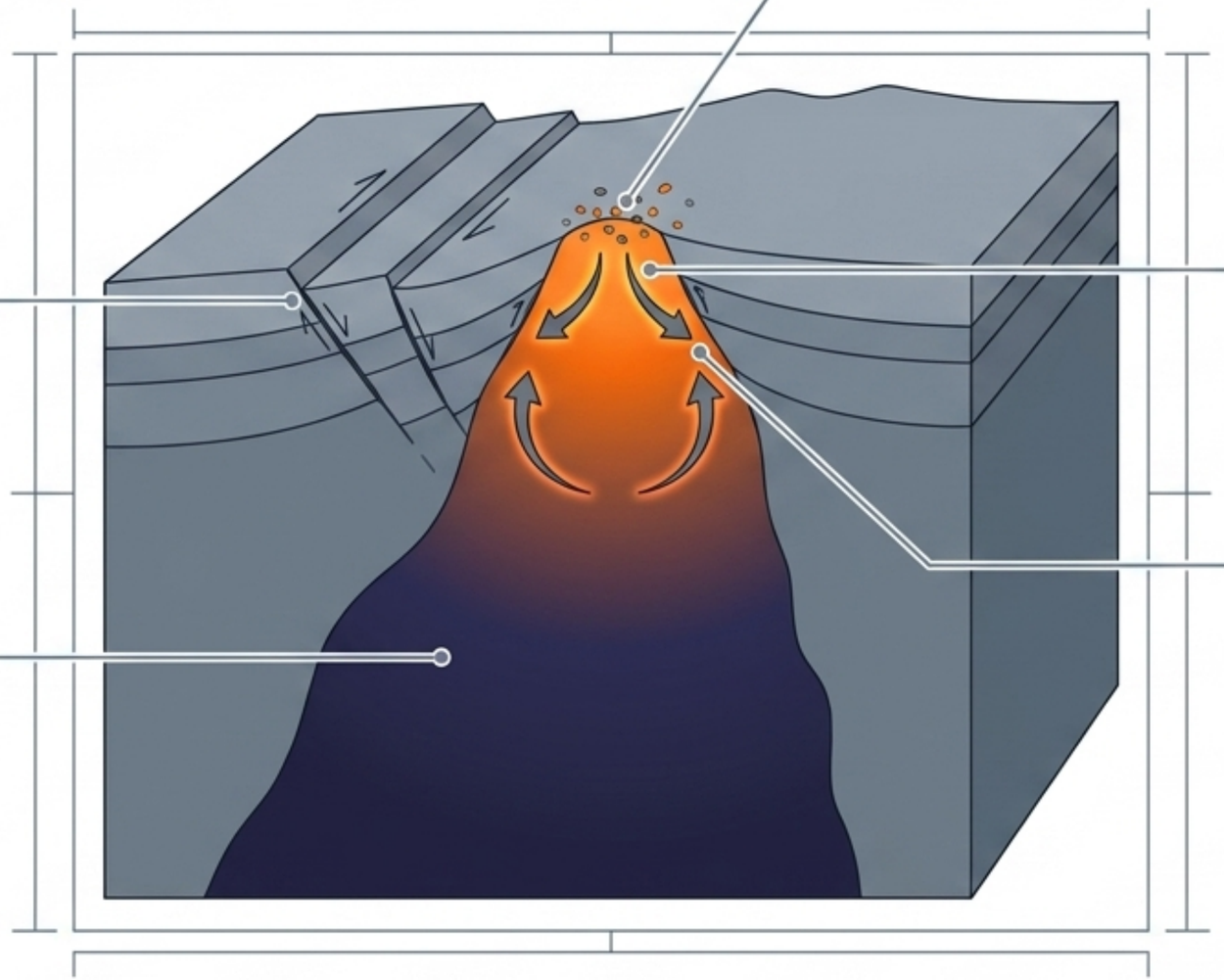


Recristallisation prismatique finale à Pen Ar Ran.

Le système n'est pas figé. La tectonique d'extension permienne provoque de multiples injections de fluides météoriques au sein de la croûte chaude.

NotebookLM

Modèle Métallogénique - Phase I : L'Enracinement (310 Ma)



Tectonique : Failles normales soulignant un régime d'extension (étirement crustal).

Magmatisme : Le corps granitique remonte et se différencie.

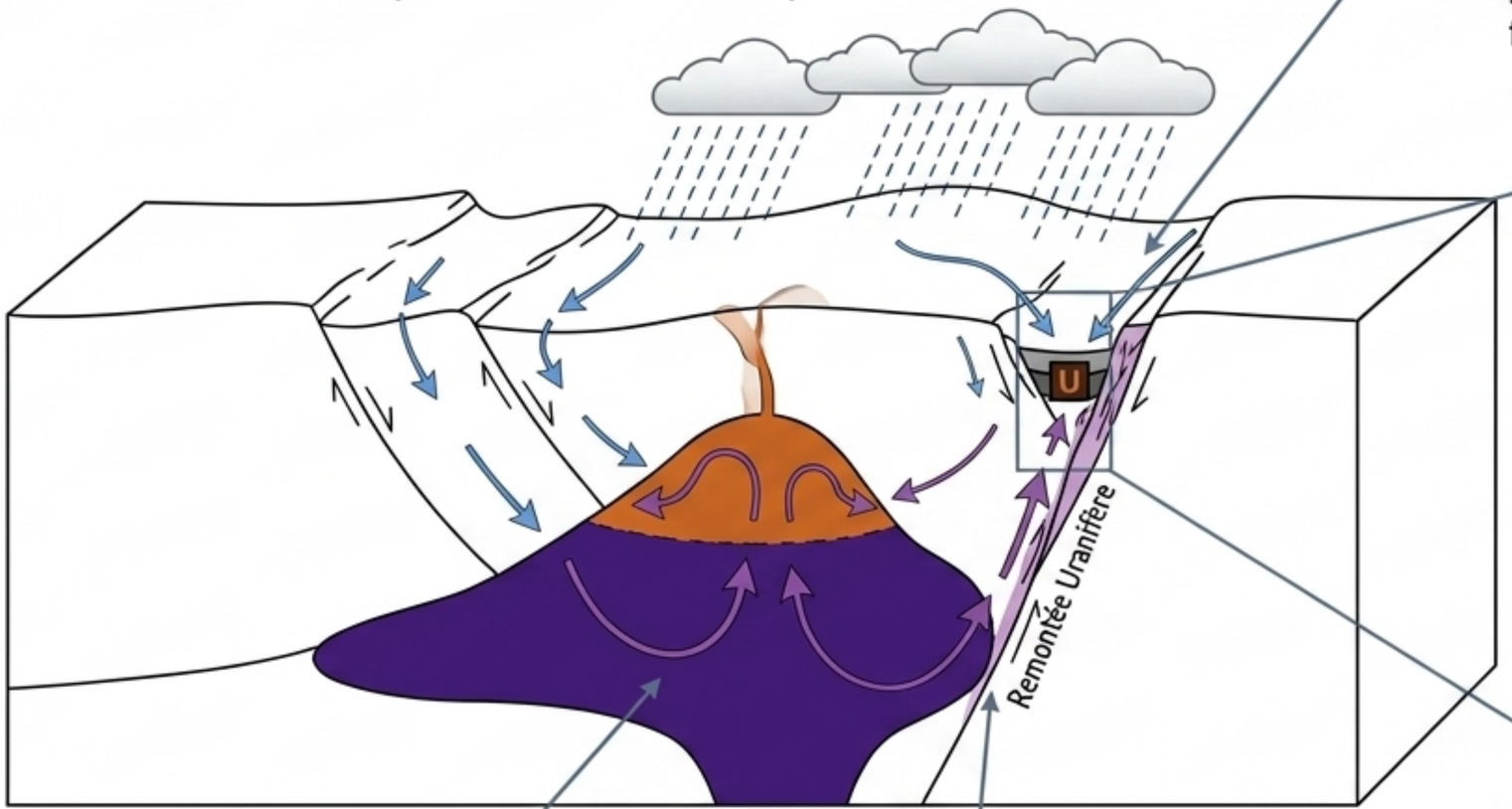
Le Résultat Pré-Métallogénique : Cristallisation de minéraux primaires fertiles : les oxydes d' magmatiques (uraninite). La source est prête.

Fluides Orthomagmatiques : Des fluides acides et réducteurs enrichissent l'apex en éléments incompatibles (Sn, Cs, Rb, W).

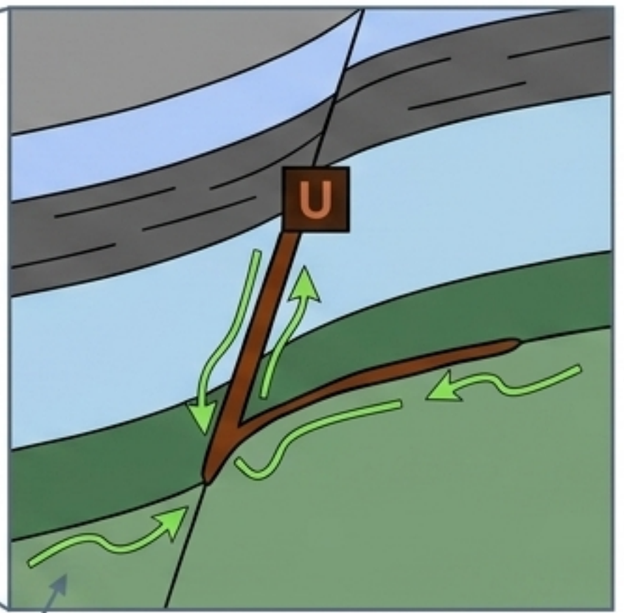
L'Apex : Les magmas les plus évolués migrent vers le sommet de l'intrusion.

NotebookLM

Modèle Métallogénique - Phase II : La Mobilisation (300 - 275 Ma)



Le Piège (Zoom sur le Graben) : Au contact brutal entre les micaschistes/volcanites et les shales noirs réducteurs, l'uranium précipite sous forme de filons massifs (Pen Ar Ran).



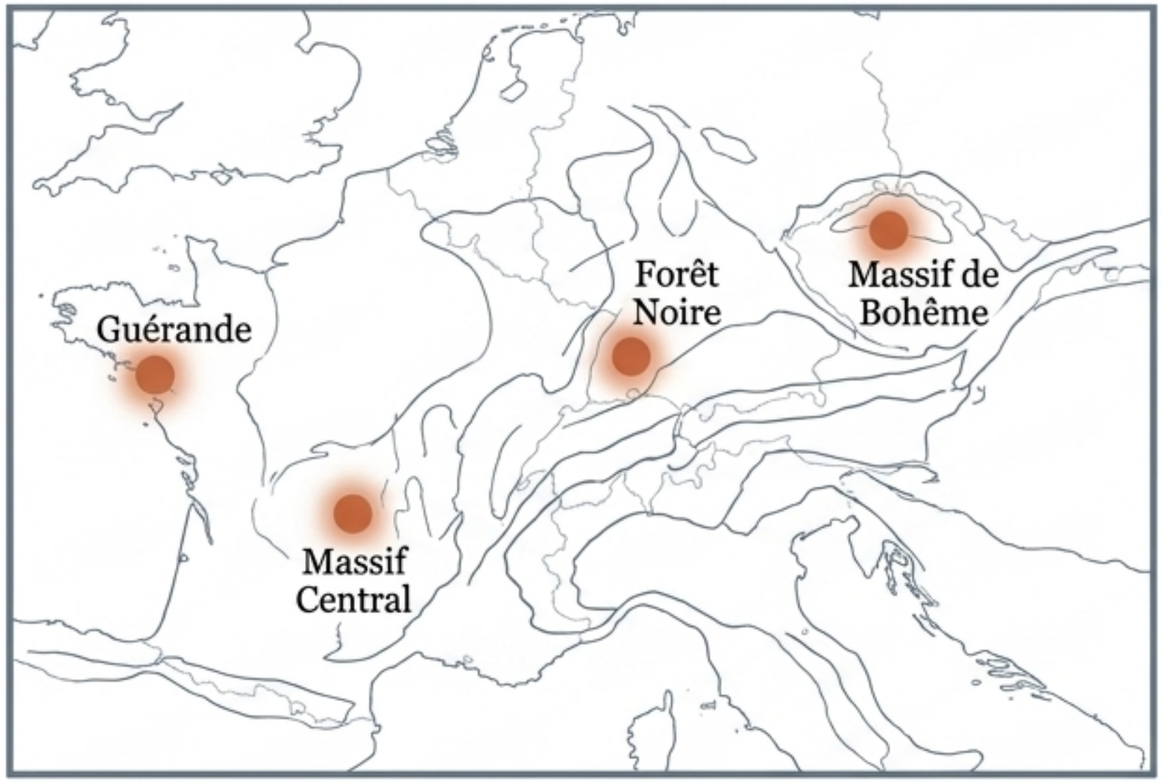
Convection & Lixiviation :
L'eau se réchauffe en profondeur (dykes tardifs), devient chimiquement agressive (oxydante), traverse l'apex granitique et dissout l'uraninite primaire.

Remontée Uranifère :
Le fluide (désormais chargé d'U6+ soluble) remonte par les zones de cisaillement.

Le Piège (Zoom sur le Graben) :
Au contact brutal entre les micaschistes/volcanites et les shales noirs réducteurs, l'uranium précipite sous forme de filons massifs (Pen Ar Ran).

NotebookLM

Conclusion : Le Modèle à l'Échelle Varisque



L'étude du complexe de Guérande établit un modèle archétypal applicable à l'ensemble des grands gisements d'uranium de la chaîne Hercynienne Européenne (Permo-Carbonifère).

1. La Source Nécessaire

Un magma leucogranitique hyperalumineux permettant la cristallisation initiale d'uraninite lixiviable (Th/U < 2).

2. Le Moteur Tectono-Thermique

Une tectonique crustale en extension couplée à une anomalie thermique persistante, forçant la circulation profonde de fluides météoriques oxydants de basse salinité.

3. L'Efficacité du Piège

La nécessité d'un contraste redox brutal (shales noirs, roches graphitiques) couplé à une plomberie structurale (zones de cisaillement) pour précipiter massivement l'Uranium.

Fin de la présentation.

NotebookLM